



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

LASEROVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ

LASER MICROMACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL LÁZNIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Lázníčka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Laserové mikroobrábění

v anglickém jazyce:

Laser micromachining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výkonový laser je možno využít i pro mikroobrábění, kdy se formou sady krátkých laserových pulzů abluje povrch obráběného materiálu. Touto metodou je možné vytvářet na povrchu různé drážky, případně dělit tenké fólie nebo vytvářet výpalky velmi malých rozměrů bez tepelného zatížení. Pro daný vláknový YbYAG laser je nutné provést technologické zkoušky a získat procesní parametry (výkon pulzu, délku pulzu, periodu, polohu ohniska) vhodné pro vytváření drážek různé hloubky a dělení materiálů malých tloušťek a rozměrů dílů.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii problematiku laserových technologií řezání a gravírování. Navrhnout metodiku experimentu. Po jeho provedení provést vyhodnocení souvislosti mezi procesními parametry a dosaženými výsledky.

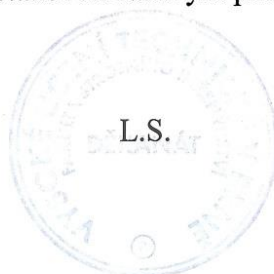
Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

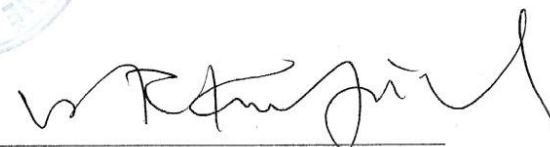
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

LÁZNIČKA Pavel: Laserové mikroobrábění

Tato práce se zabývá lasery, jejich obecnou teorií a použitím. Dále teoretická část popisuje laserové mikroobrábění a gravírování. Experimentální část práce se zabývá několika pokusy provedenými pomocí výkonového vláknového laseru, který není primárně určen pro oblast mikroobrábění. Experimenty byly vyhodnocovány hlavně pomocí několika typů mikroskopů, kde se hodnotilo množství odebraného materiálu. U jednotlivých experimentů došlo k odstranění materiálu podle použitých pracovních parametrů laseru a významnou roli hraje i obráběný materiál. Z experimentů plyne, že pro oblast laserového mikroobrábění a gravírování jsou vhodnější kratší pulsy (v experimentu byla minimální délka pulsu 1 ms), s čímž souvisí i způsob odstranění materiálu. Použitý výkonový laser je možné použít i pro mikroobrábění v určitých oblastech výroby.

Klíčová slova

Gravírování, vrtání, řezání, délka pulsu, materiál, pracovní parametry

ABSTRACT

LÁZNIČKA Pavel: Laser micromachining

This thesis deals with lasers, their general theory and application. Then a theoretical part describes laser micromachining and engraving. Experimental part of thesis deals with several experiments performed by powered fibre laser which is not primarily intended for the field of micromachining. Experiments were mainly evaluated by several types of microscopes where the amount of removed material was appraised. By particular experiments removed material was in accordance with used working parameters of laser and a significant role plays machining material. It emerges from the experiments that for the field of laser micromachining and engraving shorter pulses are more suitable (minimal pulse duration was 1 ms in experiment) and it is connected even with a way of removing material. Applied powered laser can be used for micromachining in specific fields of production.

Key words

Engraving, boring, cutting, pulse duration, material, working parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LÁZNIČKA, Pavel. *Laserové mikroobrábění*. Brno 2014. 64 s, 7 příloh, CD Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Odbor technologie svařování. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 28.5.2014

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině, že mi umožnila studovat a po celou dobu mě podporovala.

Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

OBSAH

ZADÁNÍ

ABSTRAKT

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

ÚVOD 9

1 LASER..... 10

1.1 Historie laserové technologie 10

1.2 Základní charakteristika laserů 11

1.2.1 Základní části laseru 11

1.2.2 Princip laseru 12

1.2.3 Vlastnosti laserového paprsku 13

1.2.4 Příčné rozložení intenzity záření - mód 15

1.2.5 Absorpce laserového paprsku materiálem 15

1.3 Rozdělení laserů 16

1.4 Druhy laserů 18

1.4.1 Kapalinové lasery 18

1.4.2 Plynové lasery 18

1.4.3 Pevnolátkové lasery 19

1.5 Aplikace laserů 23

1.5.1 Laserové svařování 23

1.5.2 Laserové řezání 23

1.5.3 Tepelné zpracování povrchu materiálu laserem 24

1.5.4 Navařování laserem 25

1.5.5 Pájení laserem 26

1.5.6 Vrtání laserem 26

1.5.7 Ostatní aplikace laseru 26

2 LASEROVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ A GRAVÍROVÁNÍ..... 27

2.1 Laserové gravírování a značení 27

2.2 Interakce laserového paprsku s materiálem 29

2.3 Laserový paprsek 31

2.4 Laserové pulsy 32

2.5 Parametry laseru 34

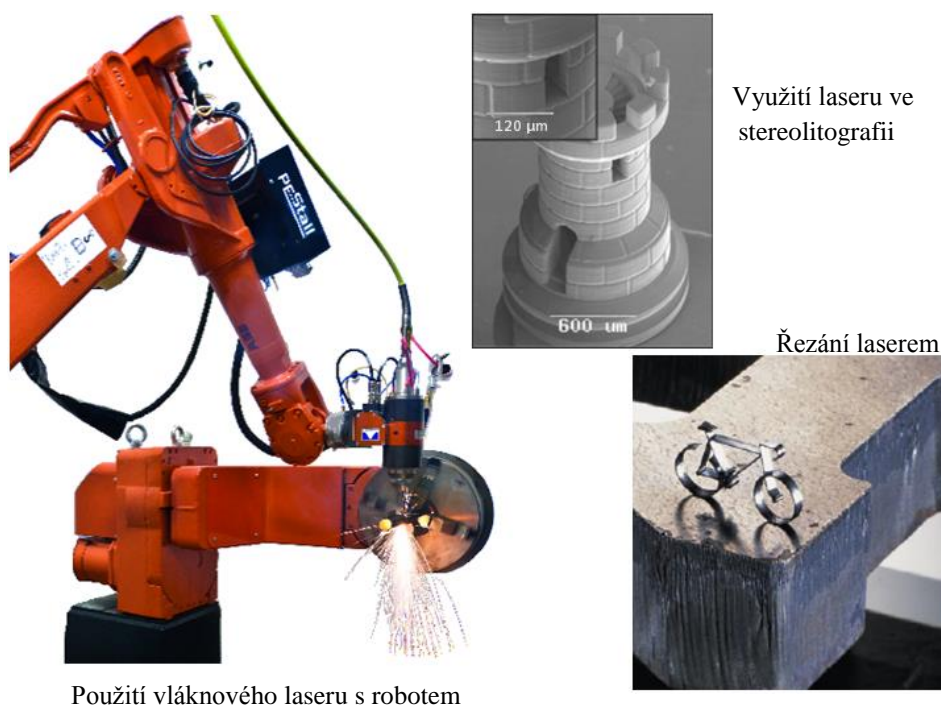
2.6 Materiály 35

2.7	Mikroobrábění s piko a femtosekundovými pulsy	36
2.8	Druhy laserů pro mikroobrábění a gravírování	36
2.8.1	Výstupní hlavy laserů	38
2.9	Aplikace laserového mikroobrábění	39
2.9.1	Laserové mikro vrtání	39
2.9.2	Laserové mikro řezání	40
2.9.3	Laserové 2,5 D a 3D mikroobrábění (ablování)	42
2.9.4	Ostatní aplikace laserového mikroobrábění	43
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	44
3.1	Popis používaných strojů a zařízení	44
3.2	Drážky v konstrukční a korozivzdorné oceli	46
3.3	Řady jednotlivých pulsů	51
3.4	Drážky v křemíku a ve skle s karbo-nitridovou vrstvou	54
3.4.1	Drážky v křemíku	54
3.4.2	Drážky ve skle s karbo-nitridovou vrstvou	56
3.5	Gravírovaný povrch	58
3.6	Vrtání	61
4	DISKUZE	63
	ZÁVĚR.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	
	SEZNAM PŘÍLOH	

ÚVOD

Laser má v dnešní době velmi široké využití a na jeho počátcích pravděpodobně nikdo netušil, kam až bude sahát jeho využití (obr. 1). Postupem času se ukázalo, že laser je velmi univerzální nástroj. Můžeme se s ním setkat v každodenním životě, ale i v různých odvětvích průmyslu, v medicíně, vědě a v mnoha dalších oblastech. Díky širokému využití lze laser srovnávat s největšími objevy lidstva. Většina lidí si pod pojmem laser představí úzký paprsek světla různé barvy, zjednodušeně lze takto popsat i jeho dvě základní vlastnosti a tím je právě jeho nízká rozbíhavost (divergence) a „jednobarevnost“ (monochromaticnost). Právě specifické vlastnosti laserového paprsku stojí za jeho širokým použitím. Dalším směrem, kterým se část vývoje laserů ubírá, je oblast miniaturizace výrobků, kde se využívá laserové mikroobrábění díky možnosti laserový paprsek fokusovat na velmi malé rozměry. Za poměrně novým odvětvím laserového mikroobrábění stojí neustálé zvyšování tvarové složitosti součástí, zpřesňování rozměrů, zmenšování výrobků, ale i zkracování výrobních časů výroby. Vývoj laserů není zdaleka u konce a v dnešní době se lasery neustále zdokonalují a vyvíjí jak po stránce vyšší účinnosti, vyšších hustot výkonu, lepší kvality paprsku, tak se neustále nacházejí nové možnosti využití laserů.

Laser patří mezi nekonvenční technologie výroby. Laserový paprsek je bezkontaktní nástroj, u kterého nejsou rozhodující mechanické vlastnosti obráběného materiálu, a proto ho lze využít pro jinak těžkoobrobitelné materiály. Ve srovnání s jinými nekonvenčními způsoby obrábění lze u laserového paprsku dosáhnout nejvyšších hustot energie, čehož se zvláště využívá ve strojírenském odvětví při řezání, svařování a povrchových úpravách kovů. Laserové mikroobrábění je jen úzkou oblastí a zároveň poměrně novou aplikací, která v dnešní době nachází stále širší uplatnění právě díky jedinečným vlastnostem laserového paprsku. Pod pojem laserové mikroobrábění lze zahrnout řezání, vrtání, 3D obrábění, gravírování a úpravu povrchu. Společným rysem těchto způsobů obrábění je vždy úběr materiálu o objemech v jednotkách mikrometrů až milimetrů krychlových.



Obr. 1 Příklady laserové technologie [12, 17, 66].

1 LASER

Úzký paprsek světla - tak lze jednoduše charakterizovat laser. V dnešní době našly lasery v průmyslu široké využití a často tvoří nepostradatelnou součást výroby. Laser obecně dosahuje velmi dobrých výsledků, což je často vyváжено jeho vysokou pořizovací cenou. Laser je poměrně složité zařízení, a proto trvalo určitou dobu, než došlo k jeho prvnímu využití.

1.1 Historie laserové technologie

Za počátek laserů lze považovat objev stimulované emise Albertem Einsteinem v roce 1917. Stimulovaná emise je jev, který může probíhat za určitých podmínek a je základem laserů. O několik let déle byla stimulovaná emise potvrzena R. Ladenburgem a H. Kopfermannem. V roce 1940 fyzik V. A. Fabrikant navrhl použít stimulovanou emisi v plynném prostředí k zesílení světla, což je v podstatě princip laseru. Přesto Nobelovu cenu za objev laseru získali Ch. H. Townes, N. G. Bassov a A. N. Prochorov, kteří se především zasloužili o vznik nového fyzikálního oboru kvantová elektronika [1].

Cesta od objevu stimulované emise k laseru v takové podobě, který známe dnes, vedla přes tzv. maser. Název maser pochází z počátečních písmen názvu Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilovač mikrovln pomocí stimulované emise záření. Maser generuje a zesiluje mikrovlnné elektromagnetické záření pomocí stimulované emise [1, 2].

První koncept laseru byl popsán v roce 1958 a zasloužila se o to dvojice Ch. H. Townes a A. L. Schawlow, samotný pojem laser zavedl o rok později G. Gould. Název laser vznikl stejně jako maser, ale rozdíl v názvu je i principiálním rozdílem, kde místo zesilování mikrovlnného záření dochází k zesílení světla nucenou emisí záření. T. Maimann vyřešil problém s aktivním prostředím (syntetický krystal rubínu), kde musel udržet světlo dostatečně dlouho, tak aby se mohlo zesílit. Řešení přinesl rezonátor a roku 1960 sestrojil první laser (obr. 2). V následujících letech se začaly objevovat další druhy laserů s různými druhy aktivních prostředí, způsobem buzení, výkonem a dalšími rozdíly. Posupně se ukázalo, že v laserech je obrovský potenciál a lze je využít v mnoha oborech. První aplikace laseru se týkala očního lékařství, první operace oka pomocí laseru proběhla už v roce 1964 [2, 3].



Obr. 2 Podoba prvního laseru [7].

Historie laserů na území ČR

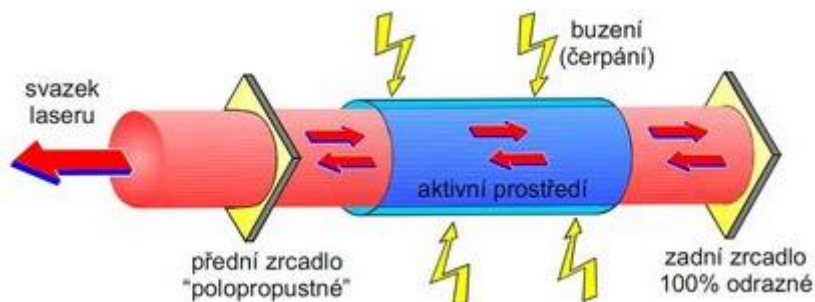
V Československu se první lasery objevily už v roce 1963 téměř současně na třech vědeckých pracovištích, jeden z nich byl plynový laser zkonstruovaný na vědeckém pracovišti Ústavu přístrojové techniky v Brně. Koncem 70. let v ústavu fotoniky a elektroniky akademie věd vyvinuli technologii na výrobu polovodičových laserů a od 90. let se zde podílejí na vývoji vláknových laserů. Na přelomu tisíciletí bylo založeno vědecké centrum Pals s výkonovým pulzním laserem pro experimentální účely. V České republice má laserová technologie bohatou historii a díky rozvíjejícímu se projektu ELI Beamlines je i budoucnost velmi slibná [2, 4].

1.2 Základní charakteristika laserů

Jsou zde uvedeny základní části laseru. Popsán jeho princip a charakteristické vlastnosti paprsku a také důležitý parametr při zpracování materiálu laserem, kterým je absorpce laserového paprsku.

1.2.1 Základní části laseru

Základ laseru, který tvoří aktivní prostředí a optický rezonátor je zobrazen na obrázku 3, mezi další části laseru patří budící zařízení a podstatný prvek je také vedení laserového paprsku.



Obr. 3 Základní část laseru [5].

Aktivní prostředí

Aktivní prostředí určuje základní rozdělení laserů na pevnolátkové kapalně a plynné. Je schopné zesilovat záření, které jim prochází díky stimulované emisi. Látka tvořící tuto část laseru musí být průhledná a schopná odvádět teplo vzniklé ze záření. Jedna z charakteristik laserového paprsku je vlnová délka, která je právě určena druhem aktivního prostředí. První zkonstruovaný laser měl aktivní prostředí tvořené krystalem rubínu, v dnešní době se používá nepřeberné množství látek všech skupenství. Tyto látky odlišují jednotlivé lasery a jejich využití [6, 7, 8].

Optický rezonátor

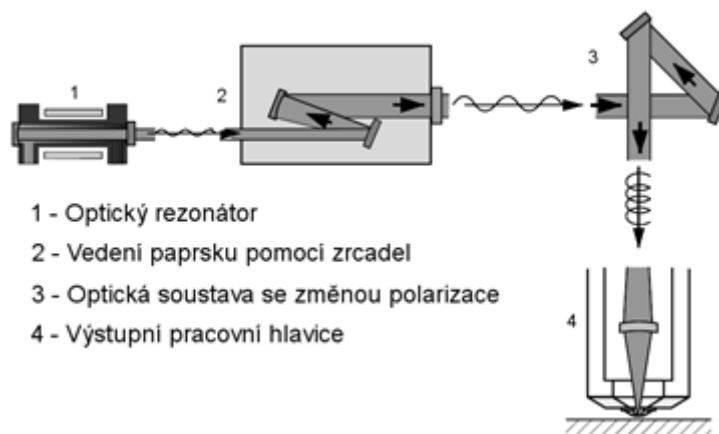
Je optická soustava umožňující zformátovat a zesílit záření, které z něj následně vystupuje. Optický rezonátor obvykle tvoří nejméně dvě přesně ustavená, rovnoběžná zrcadla, která mají společnou osu. Fotony vzniklé stimulovanou emisí, které se šíří rovnoběžně s osou zrcadel se udrží v optickém rezonátoru, ostatní fotony po několika odrazech vyletí ven. V případě dvou zrcadel je jedno zrcadlo polopropustné a druhé je nepropustné. Vlivem absorpce záření v zrcadlech vznikají ztráty. U vysoce výkonných laserů tyto ztráty zahřívají zrcadla a musí se chladit. Tvar a velikost zrcadel často určuje rozdělení intenzity v paprsku. Toto rozdělení intenzity v průřezu paprsku charakterizuje tzv. mód [6, 7, 9].

Budící zařízení

Buzení (čerpání) dodává do aktivního prostředí energii, která je poté pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. Buzením jsou atomy aktivní látky vybudeny na vyšší energetickou hladinu a poté zůstávají ve vybuděném (excitovaném) stavu, dokud nedojde k stimulované emisi. Způsob buzení je dán aktivním prostředím. U pevnolátkových laserů k buzení dochází obvykle pomocí výbojek nebo LED diod, u laserů s plyným aktivním prostředím k buzení dochází nejčastěji elektrickým výbojem, střídavým nebo stejnosměrným proudem, ale existují i další způsoby buzení [6, 7].

Vedení laserového paprsku

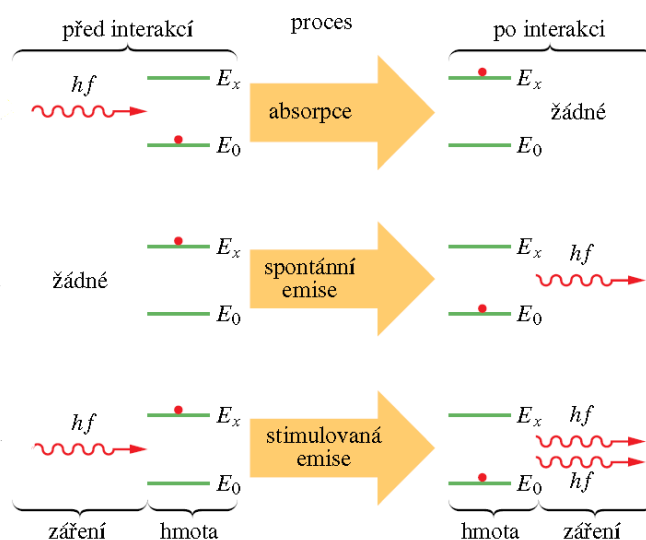
Laserový paprsek musí být z aktivního prostředí, přenesen a upraven až do výstupní hlavy (obr. 4). Jednou z možností pro přenos paprsku je soustavou zrcadel a čoček, tato varianta je často používána pro 2D aplikace (řezání plechů). Další variantou přenosu laserového paprsku je pomocí optického vlákna, tato varianta je vhodná pro přenos paprsku u 3D aplikací s využitím průmyslových robotů. Paprsek je zde přiveden do libovolné polohy výstupní hlavy, která je připevněna na rameni průmyslového robota [6, 7, 9].



Obr. 4 Vedení laserového paprsku pomocí zrcadel [9].

1.2.2 Princip laseru

Základním prvkem každého laseru je aktivní prostředí, v kterém vzniká a zároveň se zesiluje záření pomocí stimulované emise. Stimulovaná emise je jev, který za určitých podmínek může vzniknout po interakci fotonu s atomem. Mezi další jevy patří absorpce a spontánní emise. Na obrázku 5 jsou znázorněny tyto 3 jevy na energetických hladinách s energií E_0 a E_x , elektromagnetické záření je označeno hf , kde h je Planckova konstanta a f frekvence elektromagnetického záření. Energie je dodávána budícím zařízením [7, 10, 11].



Obr. 5 Princip vzniku laserového paprsku (stimulované emise) [10].

Absorpce

Atom v aktivním prostředí zaujímá základní stav s minimální energií E_0 (na hladině 1) a zde setrvává, dokud mu není dodána energie E_x (hladina 2), pomocí fotonu neboli elektromagnetickým zářením určité frekvence. Foton odevzdá svoji energii atomu a ten se dostane na hladinu 2 a zde setrvá určitou omezenou dobu (doba životnosti excitovaného atomu) [7, 10, 11].

Spontánní emise

Po uplynutí doby, jakou může atom setrvat v excitovaném stavu (obvyklá doba excitace je 10^{-8} s), se vrátí do základního stavu E_0 . Aby se atom dostal z energetické hladiny 2 na hladinu 1, musí uvolnit energii. Záření fotonů při spontánní emisi má různou vlnovou délku, fázi i amplitudu, toto záření je nemonochromatické a s malou intenzitou. Tímto způsobem se generuje světlo z vlákna obyčejné žárovky [7, 10].

Stimulovaná emise

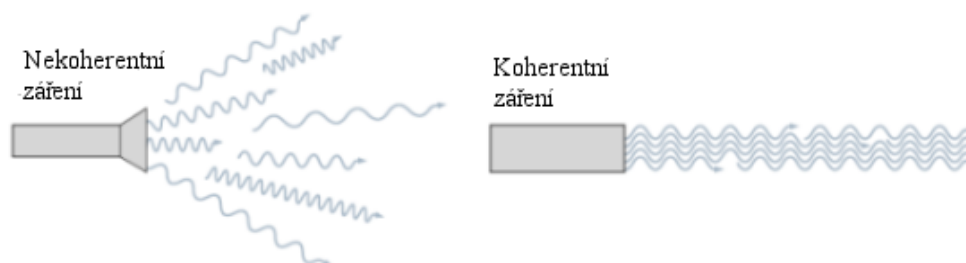
V případě, že atom absorboval energii E_x a nachází se na energetické hladině 2, může nastat stimulovaná emise. Aby k tomu došlo, musí excitovaný atom zasáhnout foton. Tento foton musí mít energii rovnou rozdílu $E_x - E_0$, poté atom sestoupí na energetickou hladinu 1 a zároveň se vyzáří další foton, což se považuje za zesílení záření. Dopadající foton na atom i následně vzniklý foton mají stejnou frekvenci, fázi a šíří se totožným směrem. Podstatou zesílení záření je stimulovaná emise, kdy narůstá počet fotonů šířících se pouze v jednom směru. Aby se zaručilo zesílení laserového paprsku v daném směru, používá se optický rezonátor, který zaručí šíření fotonů (paprsku) pouze těch, co se pohybují rovnoběžně s osou optického rezonátoru [10, 7].

1.2.3 Vlastnosti laserového paprsku

Důvodem proč lasery mají tak široké pole využití jsou jedinečné vlastnosti laserového paprsku. Jeho výhodou je fokusace na velmi malou plochu, díky tomu může mít i velmi vysokou hustotu energie až $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a v pulzním režimu i více. Dále jsou uvedeny základní vlastnosti paprsku [7].

Koherence

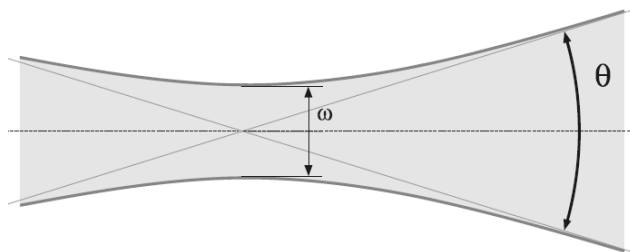
Záření vycházející z laseru má v daném místě a okamžiku stejnou vlnovou délku, stejný směr a fázový posun (obr. 6) [7, 12].



Obr. 6 Rozdíl mezi koherentním zářením z laseru a nekoherentního zdroje záření [12].

Divergence (rozbíhavost)

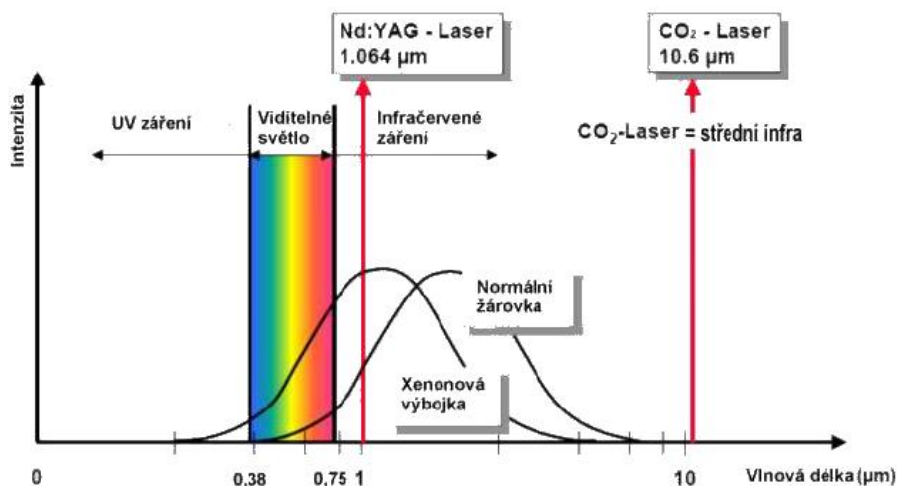
Laserový paprsek lze fokusovat na velmi malou plochu díky malé rozbíhavosti paprsku. S fokusací úzce souvisí i vlnová délka, čím je vlnová délka kratší, tím je větší schopnost zaostřit paprsek na menší plochu. Mezi nejdůležitější parametry patří průměr zaostřeného paprsku (nejúžší místo) ω a úhel rozbíhavosti paprsku Θ (obr. 7) [7, 9].



Obr. 7 Divergence paprsku [9].

Monochromaticita

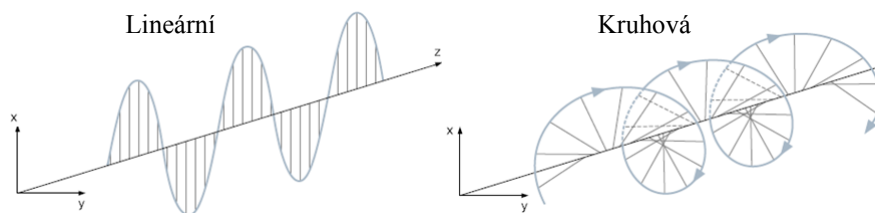
Podstatou stimulované emise je emitování stejných fotonu, proto má laserový paprsek jednu vlnovou délku, na rozdíl od jiných zdrojů světla jako např. běžná žárovka nebo xenonová výbojka (obr. 8) [7, 13].



Obr. 8 Elektromagnetické záření s různými zdroji světla [13].

Polarizace

Světlo je elektromagnetické vlnění, pokud jeho vektor stále kmitá v jedné rovině, jedná se o lineárně polarizované světlo. Běžné zdroje světla jsou nepolarizované, laserový paprsek může být lineárně nebo i kruhově polarizovaný (obr. 9). Pro univerzální použití laseru je vhodnější kruhová polarizace [10, 12].



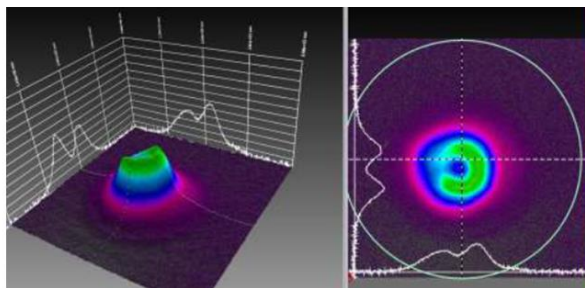
Obr. 9 Polarizace [12].

1.2.4 Příčné rozložení intenzity záření - mód

Laserový paprsek má charakteristické rozložení intenzity v příčném a podélném směru, označovaný jako TEM (transverse electromagnetic mode). Tvar a rozložení intenzity záření je dán geometrickou konstrukcí optického rezonátoru a také dalšími optickými komponenty. Dokonalá symetrie módu je základem pro mnoho aplikací. Tvar módu se může zjistit dvěma způsoby (obr. 10) jednou možností je pomocí speciálního plexiskla, na toto plexisklo se pustí nefokusovaný laserový paprsek a charakteristické rozložení intenzity záření se v ní projeví. Další možností zjištění módu je pomocí speciálního zařízení, které přenese charakteristický tvar intenzity záření do počítače a může být dále zpracován [6, 9, 11].



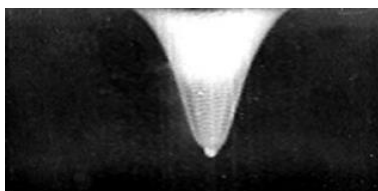
Mód v plexiskle



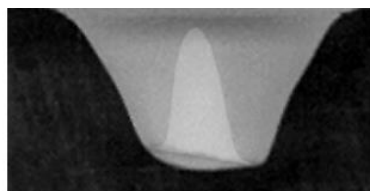
Mód zobrazený pomocí PC

Obr. 10 Zobrazení módu [12, 13].

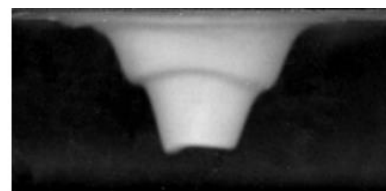
Základní mód je označován TEM_{00} , jeho tvar odpovídá Gaussovu rozložení, má nejvyšší intenzitu záření v ose paprsku a s narůstající vzdáleností od osy se intenzita snižuje. Tento mód je převážně používán při řezání. Další mód označován TEM_{01} má část stejnou jako je Gaussovo rozložení, ale maximální intenzita paprsku je v určité vzdálenosti od osy paprsku a v ose paprsku je nulová. Využití módu TEM_{01} je pro povrchové úpravy, vrtání nebo i pro řezání. Existuje mnoho dalších módů s různým rozložením intenzity v paprsku (multi mode). Tvar jednotlivých módů je zobrazen na obrázku 11. Mezi základní určující parametr paprsku patří k-číslo, které nabývá hodnot od 0 do 1 nebo M^2 parametr, který je převrácenou hodnotou k-číslo [6, 9, 13].



TEM_{00} ($K=0,9$)



TEM_{01} ($K=0,6$)



Multi mode ($K=0,25$)

Obr. 11 Druhy rozložení intenzity v laserovém paprsku [9].

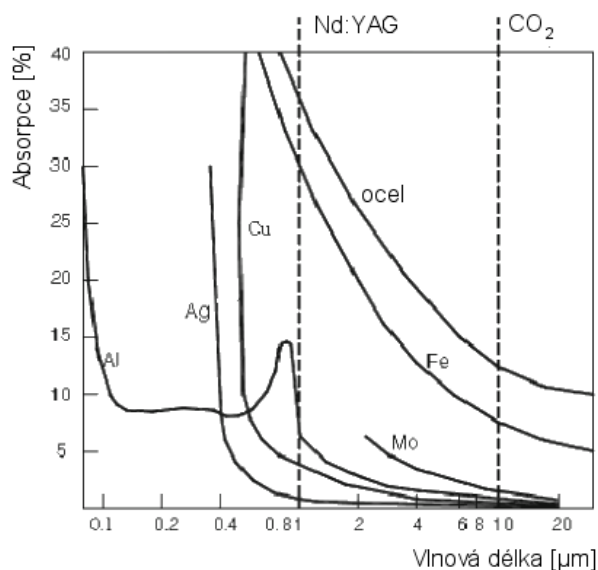
1.2.5 Absorpce laserového paprsku materiálem

Absorpce laserového záření materiálem je důležitým aspektem u všech laserových aplikací, ovlivňuje především pracovní rychlost a proto také šířku tepelně ovlivněné oblasti (někdy uváděno HAZ – heat affected zone). Pomocí absorpce dochází k ohřevu, natavení nebo až sublimaci materiálu v závislosti na hustotě výkonu a právě na absorpci materiálu. Při interakci laserového paprsku s materiálem dochází k jeho absorpci, ale také k odrazu nebo u transparentních materiálů k průchodu paprsku [14, 15].

Poměr mezi jednotlivými složkami, do kterých se laserový paprsek rozloží, je dán hlavně vlnovou délkou záření a materiálem (obr. 12). Významným faktorem je stav povrchu materiálu, především jeho drsnost, ale absorpci také ovlivňuje přítomnost oxidické vrstvy a povrchové napětí. S narůstající teplotou míra absorpce stoupá, proto lze absorpci zvýšit předehřevem materiálu, dále úpravou povrchu (zdrsnění, povlaky) a nebo použitím laseru s vhodnou vlnovou délkou pro konkrétní materiál. Použitím laseru s vyšším výkonem se dosáhne vyšší absorpce záření, toho se využívá při zpracování materiálů s vysokou odrazivostí a tepelnou vodivostí (hliník, měď, stříbro a zlato). Část laserového paprsku je také absorbována párami a plasmou z odpařeného materiálu, což snižuje účinnost paprsku. V tabulce 1.1 je orientační srovnání odrazivosti různých materiálů při použití pevnolátkového laseru Nd:YAG s vlnovou délkou okolo 1 μm a CO₂ laseru s desetinásobnou vlnovou délkou [14, 15, 16, 17].

Tab. 1.1 Srovnání odrazivosti materiálů při různé vlnové délce [15].

Odrazivost [%] (podle vlnové délky laseru)		
Kov	Nd:YAG	CO ₂
Ocel	63	95
Hliník	73	97
Měď	90	99
Nikl	72	96
Zlato	95	98
Stříbro	96	99



Obr. 12 Absorpce záření v kovech [17].

1.3 Rozdělení laserů

Rozdělení laserů může být podle více hledisek, některé zde budou uvedeny:

- Podle režimu provozu laseru:
 - kontinuální (CW) – dodávaný výkon je konstantní,
 - pulsní, může být různá doba trvání pulsu:
 - řádově milisekundy - při pulsním svařování,
 - řádově mikrosekundy až nanosekundy s vysokou opakovací frekvencí, využití při gravírování,
 - řádově pikosekundy až femtosekundy (10^{-15} s) – mikroobrábění bez tepelného ovlivnění,
 - impulsní - pulsy s velmi vysokou energií, velmi krátká doba trvání pulsu a malá opakovací frekvence, využití v oblasti vědy [5, 18].

- Podle oblasti použití:
 - průmyslové lasery,
 - výzkumné lasery,
 - lékařské lasery,
 - vojenské lasery,
 - ostatní.
- Podle způsobu buzení (čerpání):
 - opticky,
 - elektrickým výbojem,
 - chemickou reakcí [18].
- Podle vlnové délky záření laseru:
 - infračervené (780nm - 1mm),
 - oblast viditelného záření (360nm - 780nm),
 - ultrafialové (10nm - 360nm) [7].
- Při kontinuálním provozu lze lasery rozdělit podle výkonu:
 - malé výkony (od 10^{-3}W do 10^3W),
 - velké výkony (od 10^3W až do 10^5W).
- Podle typu pracovní hlavy:
 - pevná hlava, pohyb vykonává:
 - pohyblivý stůl,
 - pohyblivý paprsek (skenovací hlava), použití při „remote welding“, gravírování nebo sublimačním řezání,
 - pohyblivá hlava.
- Dělení laserů podle aktivního prostředí je nejčastěji uváděné:
 - plynové,
 - kapalinové,
 - pevnolátkové, ty se dále dělí na:
 - tyčové,
 - vláknové,
 - diskové,
 - polovodičové [13].

1.4 Druhy laserů

Existuje mnoho typů laserů, jak je patrné z předchozí kapitoly. Pro každou aplikaci jsou vhodné určité lasery. V této kapitole budou uvedeny základní typy laserů používaných ve strojírenských aplikacích a rozděleny podle aktivního prostředí.

1.4.1 Kapalinové lasery

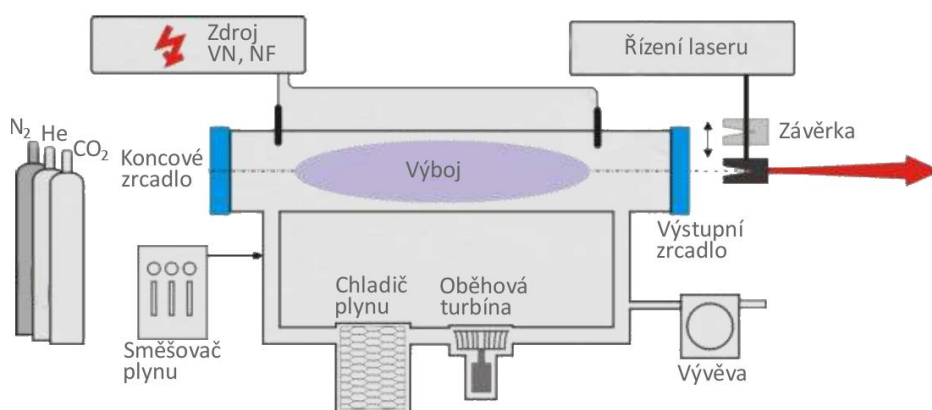
Největší výhodou těchto laserů je možnost nastavení různé vlnové délky záření od 300 nm až do 1500 nm. Aktivním prostředím těchto laserů jsou roztoky organických barviv. Nevýhodou je degradace aktivního prostředí vlivem tepla a světla při buzení. Využití těchto laserů v průmyslu je poměrně malé [24].

1.4.2 Plynové lasery

Aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo i směsí plynů. Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale je možné jejich použití i v pulsním režimu. Nejčastějším způsobem buzení je pomocí elektrického výboje a nepoužívanější plynový laser je CO₂, helium-neonový a excimerový [6].

CO₂ lasery

Tento laser je jeden z nejstarších představitelů laserů používaných ve strojírenských aplikacích, to je velkou výhodou, protože už je dobře známa problematika tohoto laseru. Patří mezi nejvýkonnější lasery vůbec (až 20kW). Účinnost laseru se pohybuje pouze v rozmezí 5 - 10%. Laser CO₂ je poměrně rozšířený a jeho hlavním použitím je řezání (ocel až 40 mm, hliník 15 mm) a sváření a to především větších tloušťek, kde je téměř nenahraditelný jinými lasery. Vlnová délka je 10600 nm, s tím souvisí možnost využití tohoto laseru při zpracování organických materiálů (dřevo, kůže, papír atd.) z důvodů dobré absorpce laserového paprsku těmito materiály. Naopak nevýhodou dané vlnové délky je vedení laserového paprsku pouze pomocí zrcadel, není možné použít vedení optickým vláknem, což v dnešních aplikacích, kde se hojně využívá průmyslových robotů je velká nevýhoda. S částečným řešením přišla firma Reis, která umístila laser přímo na rameno průmyslového robota. Základní části CO₂ laserů jsou na obrázku 13 [19, 20, 21].



Obr. 13 Základní části laseru [13].

Poslední generací CO₂ laserů je difúzně chlazený slab, které vynikají spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady (obr. 14). Dosahuje se i lepší kvality paprsku vyšší hustoty, výkonu a následně i kvalitnějšího řezu při dělení materiálu. Podstatou



Záření tohoto typu laseru se pohybuje v ultrafialové oblasti od 157 nm do 351 nm, tyto vlnové délky jsou dobře absorbovány různými materiály dokonce i vzduchem, proto u nejkratších vlnových délek musí být použito vakuum. Paprsek excimerového laseru má vysokou kvalitu s nízkou divergencí. Aktivní prostředí je směs plynů (argon, xenon a krypton), který určuje vlnovou délku záření. Buzení nejčastěji probíhá elektrickým výbojem, čímž se molekuly plynu dostanou do vybuzeného neboli excitovaného stavu (excited dimers), proto i název excimerový laser. Tyto lasery pracují v pulsních režimech, je možné dosáhnout i krátkých pulsů (v řádech ns) s vysokou opakovací frekvencí. Excimerový laser se používá k vrtání a jemnému opracování materiálu hlavně v mikroelektronice, ale také se používá v lékařství. Vlivem velmi krátkých pulsů lze dosáhnout opracování materiálu bez tepelného ovlivnění. Výkon laseru je od jednotek miliwattů až do 1200 wattů podle aplikace. Nevýhodou těchto laserů, je omezená životnost aktivního prostředí [21, 22, 23].

Aktivní prostředí tvoří pevná látka, nejčastěji se jedná o krystaly, oxidy, sklo a granáty. Buzení je nejčastěji optické. V poslední době vznikají lasery s vysokou kvalitou paprsku, která souvisí s účinným chlazením aktivního prostředí, typický představitel je vláknový laser, který je chlazený po celé délce optického vlákna, ale i kotoučový typ laseru. Důležité je v aktivním prostředí udržet konstantní teplotu, aby nedocházelo ke generování laserového záření odlišných vlastností. Podstatou nových innoslab laserů je právě kvalitní chlazení [19, 21, 25].

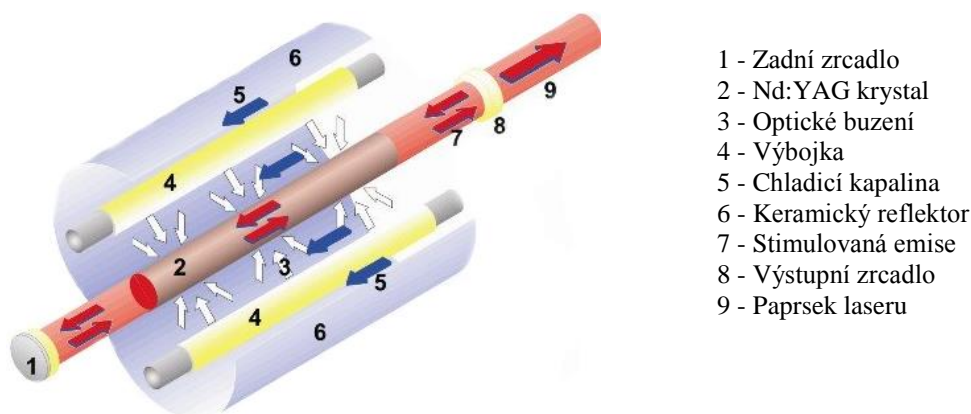
Nd:YAG

Častým představitelem pevnolátkových laserů je Nd:YAG, aktivní prostředí tvoří pevné krystalické nebo amorfní látky YAG (yttrium-aluminum-granat), dopovaný ionty plynu neodymu - Nd (Er, Yb). Nd:YAG je využitelný v mnoha oborech (vrtání, sváření, řezání, v chirurgii jako skalpel a v oční mikrochirurgii atd.), vlnová délka tohoto laseru je 1064 nm. Může pracovat v pulsním i kontinuálním provozu. Buzení je optické a to buď pomocí výbojek nebo LED diod (obr. 15). Velkou výhodou oproti CO₂ laserům je možnost vedení laserového paprsku optickým vláknem. V dnešní době jsou CO₂ lasery nahrazeny vláknovými lasery, které mají oproti tomuto laseru pouze výhody. Nd:YAG prošel vývojem:

- první generace tohoto laseru byla buzena výbojkami (účinnost pouze 2-3%),
- druhá generace tvořila polovodičové (diodové) lasery (účinnost až 60%),
- třetí generace je diskový typ laseru (účinnost do 20%).

Podle tvaru aktivního prostředí je možné Nd:YAG lasery dále rozdělit na:

- tyčové lasery (tyčinka dlouhá 15-20 cm, průměr několik mm),
- vláknové lasery (optické vlákno dlouhé řádově v metrech a průměr 50-300 μ m),
- a již zmíněný diskový laser (disk průměru až 100 mm a tloušťky několik desetin milimetru) [13, 19, 21, 25].



Obr. 15 Nd:YAG buzený výbojkami [19].

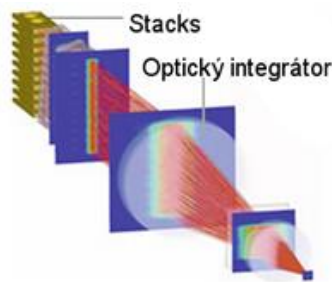
Podle výkonu se může dělit využití těchto laserů:

- do 200 W – použití v jemné mechanice, elektronice, gravírování a mikroobrábění,
- rozmezí 200 až 2000 W – převážně pro řezání, sváření a pro spékání a natavování materiálu (3D tisk),
- nad 2000 W – převážně pro sváření.

Polovodičový (diodový) laser

Tento laser má jako aktivní prostředí použitý polovodičový materiál. Polovodičový laser má v porovnání s jinými lasery mnohem vyšší účinnost až 60%. Jeho provozní i investiční náklady jsou nízké a má i poměrně dlouhou životnost, další výhodou je jeho kompaktnost. Vlnovou délku je možné měnit, pohybuje se okolo 1000 nm. Rozsah výkonu je od několika wattů až u nejvýkonnějších polovodičových laserů do 15 kW, jeho provoz je kontinuální. Hlavní nevýhodou, což polovodičový laser omezuje pro použití jen v určitých aplikacích, je

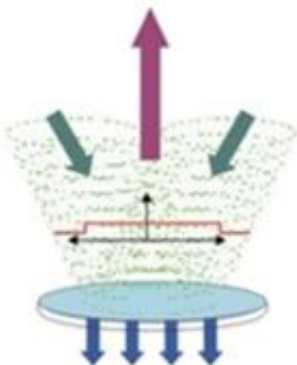
špatná kvalita laserového paprsku s velkou rozbíhavostí. Specifický laserový paprsek má i ojedinělé, téměř konstantní, rozložení intenzity nejčastěji s obdélníkovým průřezem. Jeho použití je pro povrchové úpravy – kalení, navařování a dále pro řezání a svaření plastů a kovových fólií. Dále je tento typ laseru možné využít např. v laserové tiskárně, u čtečky čárových kódů nebo v laserovém ukazovátku. Základ průmyslového polovodičového laseru tvoří tzv. stacks (obr. 16), což je kazeta s několika P-N přechody, z kterých se generuje laserové záření, ale nevhodného tvaru. Toto záření musí projít přes optický integrátor, který uspořádá laserový paprsek do požadovaného tvaru [6, 21, 26].



Obr. 16 Vznik laserového paprsku z tzv. stacku [26].

Diskový laser

Diskový typ laseru je jednou z modifikací Nd:YAG laseru, který byl popsán výše. Používají se i jiné aktivní prostředí např. Nd:YVO₄, Nd:YLF nebo Yb:YAG. V závislosti na aktivním prostředí je generován laserový paprsek s různou vlnovou délkou, Nd:YAG má vlnou délku 1064 nm, další typy mohou vyzařovat až v oblasti UV záření. Základem tohoto laseru je aktivní prostředí ve tvaru disku průměru řádově desítek milimetrů a tloušťky několika desetin milimetru (obr. 17). Tvar a geometrie aktivního prostředí umožňuje kvalitní chlazení (vzduchem nebo vodou) s rovnoměrným teplotním polem po celém disku, to umožňuje generování kvalitního laserového paprsku. Se zvyšujícím se výkonem, se kvalita nezhoršuje. Dobrá fokusace snižuje tepelné ovlivnění obráběného materiálu. Účinnost diskového laseru se pohybuje mezi 15 až 20. Mezi další nevýhody je nižší životnost (v porovnání s vláknovým laserem). Využívá se spíše pro aplikace, kde je nutný vyšší výkon (svaření a řezání), nejvýkonnější diskové lasery mají výkon až 32 kW, ale objevují se i diskové lasery pro značení a gravírování případně pro mikroobrábění. Tento typ laseru je možné použít i pro technologii „Remote welding“ (někdy označováno jako laserové skenovací svařování nebo letmé svařování) podstatou je neustále zaostřování paprsku na materiál při pohybu paprsku, kdy laserová hlava stojí [19, 21, 27].



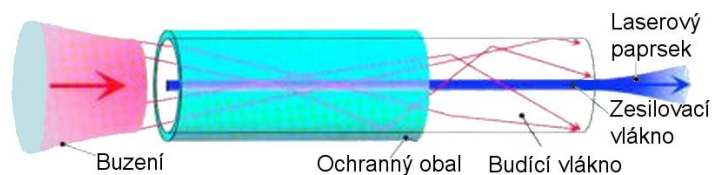
Šipky: modré - chlazení
zelené - buzení
fialové - laserový parsek

Obr. 17 Schéma diskového kotouče [19].

Vláknový laser

Vláknový laser dnes představuje nejperspektivnější směr v laserové technologii s širokou škálou výhod. Základem laseru je optické vlákno, které tvoří vedení laserového paprsku, ale také tvoří aktivní prostředí a dochází v něm i k buzení a generování laserového paprsku. Vlnová délka se pohybuje okolo 1064 nm u Nd:YAG, u ostatních typů se liší. Jádrem optického vlákna - aktivního prostředí je dopované prvky vzácných zemin, nejčastěji se používá erbium,

ytterbium nebo i praseodym, případně jejich kombinace. Optické vlákno zde odpovídá krystalu u pevnolátkových laserů a je dlouhé až několik metrů (obr. 18) [13, 27].



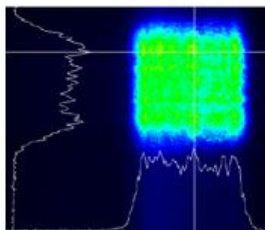
Obr. 18 Vláknový laser [13].

Optický rezonátor je speciální technologií výroby vytvořen podél optického vlákna, čímž odpadá seřizování optického rezonátoru. Další výhodou je, že není potřeba optických komponentů pro navázání paprsku od zdroje záření do optického vlákna. Chlazení probíhá vzduchem po celé jeho délce a je dokonce účinnější než u kotoučových laserů. Díky všem těmto výhodám má vláknový laser vynikající jakost paprsku a proto také je možno dosáhnout velmi vysoké hustoty výkonu (10^9 W.cm^{-2}). Buzení probíhá pomocí LED diod, které mají velmi dlouhou životnost a to až 100 000 h. Účinnost vláknových laserů je poměrně vysoká a to až 35 %, výhodou laseru je i jeho modulární uspořádání a nízké provozní náklady. Výkon tohoto laseru může být až 100 kW, tento výkon je použitelný spíše pro speciální aplikace, ale i přesto vyšší hodnoty výkonu (20 kW) mohou např. u svaření zvýšit několikanásobně svařovací rychlost oproti méně výkonným laserům. V porovnání vláknového laseru při svaření s CO_2 lasery je menší spotřeba elektrické energie a užší svár u vláknových laserů, jedním z důvodů je právě vysoká kvalita laserového paprsku. Dále se vláknový laser používá pro řezání a to především pro slabé plechy do tloušťky 3 mm [13, 27].

Dalším polem působnosti vláknového laseru je mikroobrábění. Firma CeramOptec vyvinula laser o výkonu 1,3 kW, který je schopný pracovat v pulsním režimu s délkou trvání pulsu řádově ve femtosekundách. Tento laser může být přínosem při obrábění speciálních materiálů, u kterých by došlo vlivem vneseného tepla k jejich degradaci [27].

Innoslab laser

Stejně jako plynové CO_2 lasery se slab technologií, mají i pevnolátkové lasery podobné zástupce s názvem innoslab lasery. Aktivní prostředí má deskový tvar z důvodu účinného chlazení, čímž se dosáhne kvalitního paprsku. Firma Edgewave je hlavním výrobcem innoslab laserů, které dosahují vysokých špičkových výkonů při délce pulsu v rozsahu ns až ps, vlnová délka se pohybuje od 266 nm do 1064 nm. Rozložení intenzity výstupního paprsku lze měnit pomocí optických prvků, častým rozložením intenzity záření je tzv. top-hat (Obr. 19). Krátkých pulsů a vhodným rozložením intenzity záření lze využít při ablování povrchu s minimálním tepelným ovlivněním materiálu obrázek 20 [27, 28].



Obr. 19 Čtvercové rozložení intenzity
Záření v paprsku (top-hat) [28].



Obr. 20 Ablovaný povrch materiálu [28].

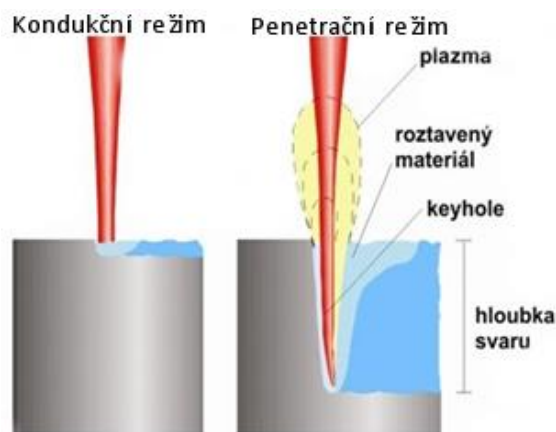
1.5 Aplikace laserů

Ve strojírenském průmyslu je široké využití laserových technologií. Využívá se především jeho vysoký výkon, který je možný soustředit na velmi malou plochu. U výrobků se dosahuje vysoké kvality, přesnosti a reprodukovatelnosti. Všechny tyto výhody jsou vyváženy poměrně vysokou pořizovací cenou laserů.

1.5.1 Laserové svařování

Svařování je velmi častou aplikací laserů. Mezi nejpoužívanější lasery pro svařování patří CO₂ lasery a pevnolátkové lasery. Velkou výhodou je možnost vedení laserového paprsku optickým vláknem do výstupní hlavy, která je často vedena robotem. Mezi hlavní výhody laserového svařování patří svařitelnost různorodých materiálů, s možností svařovat i nekovové materiály jako jsou plasty. Další výhodou je velmi malá tepelně ovlivněná oblast s vysokou štíhlostí sváru, což přispívá k omezení vzniku tepelných deformací. Používají se ochranné plyny (Ar, N₂, CO₂ nebo He) především pro ochranu svařovaného materiálu před okolní atmosférou. Vlivem poměrně vysoké pořizovací ceny laserů a nutnosti použití přípravků má svařování laserem své místo hlavně v automatizovaném a velkoobjemovém provozu. U laserového svařování se nepoužívá přídavný materiál a svařovací režim může být jak kontinuální tak i pulsní [13, 29, 30].

Při svařování laserem se mohou použít 2 režimy – tzv. kondukční nebo penetrační režim (obr. 21), tyto režimy se odlišují hustotou výkonu. Při kondukčním režimu se dosahuje hustoty výkonu maximálně 10^6 W.cm^{-2} , podstatou je natavení pouze povrchové vrstvy materiálu, vzhled tohoto sváru na řezu je podobný sváru vytvořeného elektrickým obloukem. Penetrační režim dosahuje hustoty výkonu až 10^8 W.cm^{-2} a dochází ke vzniku tzv. keyhole. Keyhole je dutina, která vzniká vlivem expanze par roztaveného kovu, stěny dutiny jsou tvořeny roztaveným kovem [29, 30].



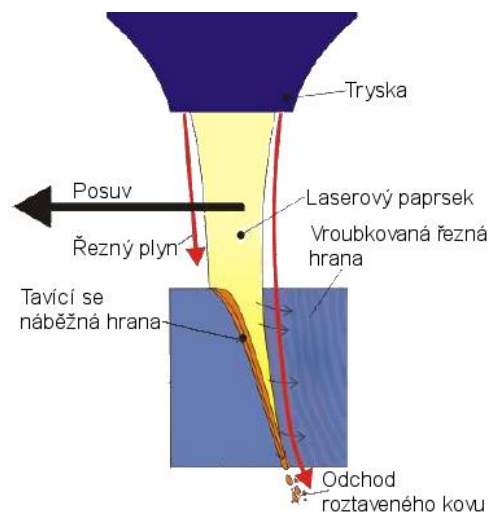
Obr. 21 Režim svařování [30].

Mezi speciální aplikace patří hybridní laserové svařování, což je kombinace laserového a elektrického obloukového svařování. Dosáhne se převýšeného sváru, který je typický u elektrického odporového svařování, ale vlivem laseru i hlubokého průvaru. Remote welding je modifikací laserového sváření, kde se dosahuje vysokých svařovacích rychlostí. Další aplikací je laserové mikro svařování [29, 30].

1.5.2 Laserové řezání

Dělení materiálu patří mezi velmi časté průmyslové aplikace laserů, využívá se pro řezání plechů, profilů, ale i prostorových obrobků. Výhodou řezání laserem je malá tepelně ovlivněná oblast v okolí řezu (několik desetin mm), dosahuje se vysokých přesností a kolmých řezů s úzkou spárou. Obecně je pro tenké plechy vhodnější pevnolátkový laser a pro silnější plechy (nad 3 mm) CO₂ laser, ale v současnosti se stále více používají pevnolátkové a především vláknové lasery. U tenkých plechů se dosahuje vysokých řezných rychlostí (až 15 m.min^{-1}). Dělení laserem je možné použít i pro nekovové materiály [31, 32, 33].

Podstatou řezání laserem je velmi rychlý ohřev materiálu, který se dostane do tekutého stavu, vlivem expanze par se vytvoří tzv. keyhole a následně se materiál stlačeným plynem odstraní z řezné spáry (obr. 22). Podle druhu řezného plynu se rozlišuje dělení materiálu na tavné a oxidační. Další možností je řezání stlačeným vzduchem, ale pouze pro materiály tloušťky několika milimetrů [31, 33].



Obr. 22 Princip řezání [32].



Obr. 23 Ukázka oxidačního řezání [34].

Tavné řezání

Tavný způsob řezání je vhodný pro barevné kovy a korozivzdorné oceli, využívá se inertní plyn (dusík nebo argon) jako řezný plyn. Spotřeba plynu je poměrně vysoká, tlak plynu je přibližně 15 barů. V porovnání s oxidačním řezáním je tato metoda nákladnější [31, 32].

Oxidační řezání

Při oxidačním způsobu řezání (řezání plamenem) se používá kyslík, který způsobí, že kov v proudu kyslíku částečně shoří. V průběhu řezání dochází k exotermické reakci, která snižuje potřebný výkon laseru a zvyšuje rychlost řezání. Kvalita řezu je horší a tlak kyslíku menší (5 barů) než u tavného řezání. Tento způsob je vhodný pro konstrukční oceli tloušťky materiálu až 30 mm (obr. 23) [32, 33, 34].

Plazmové řezání

Zvláštním způsobem je plazmové řezání, vlivem vysoké intenzity se v místě řezu tvoří plazma, která přispívá k zpětnému ohřevu materiálu. Tímto způsobem je možné řezat korozivzdorné oceli nebo barevné kovy až do 50 mm, ale povrch je poměrně hrubý [31, 32].

Sublimační řezání

Dalším způsobem dělení materiálu je sublimační řezání, které se používá pro kovové fólie nebo i anorganické materiály. Tento způsob řezání je podrobně popsán v kapitole 2.9.2 *Laserové mikro řezání* [31, 32].

1.5.3 Tepelné zpracování povrchu materiálu laserem

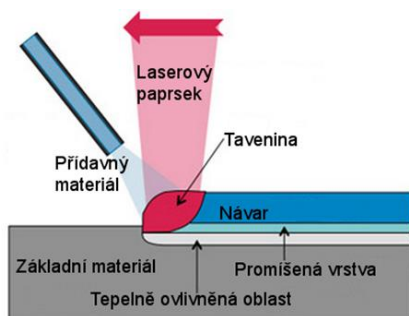
Mezi nejčastější způsob tepelného zpracování laserem je povrchové kalení materiálu. Dosahuje se zakalení pouze povrchové vrstvy, hloubka závisí na materiálu a na pracovních parametrech laseru, z tohoto důvodu dochází pouze k minimálním tepelným deformacím

a součást v některých případech není ani nutné dále zpracovávat. Na povrchu vzniká oxidová vrstva, její vznik se může zamezit použitím ochranného plynu. Výhodou je možnost lokálního kalení na daných místech, kdy zbytek součásti zůstává tepelně neovlivněný. Je možné kalit tvarově složité plochy i s obtížnou přístupností. Používají se vláknové, CO₂ a diodové lasery, laserový paprsek se pomocí optických integrátorů upraví na určitý tvar (obvykle obdélník), výhodu v tomto směru má diodový laser, který generuje laserový paprsek ve tvaru, který je možné pro tepelné zpracování přímo použít. Použití laserového tepelného zpracování je i z ekonomických důvodů výhodné, hlavně tam kde je nutné tepelné zpracování pouze na určitém místě součásti (nemusí se ohřívat celý výrobek) [35, 36].

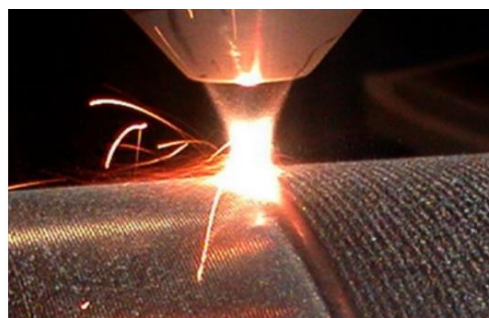
Principem laserového kalení je prudký ohřev povrchu materiálu vhodně fokusovaným laserovým paprskem a následné ochlazení probíhá samovolně, odvodem tepla do materiálu. Kalicí teplotu na povrchu materiálu je možné kontinuálně měřit pyrometrem a v závislosti na teplotě měnit výkon laseru. Nevýhodou při kalení velkých ploch je, že vznikají místa s nerovnoměrnou tvrdostí (napojení jednotlivých průjezdů laserového paprsku), v těchto místech dojde k popuštění předchozí zakalené vrstvy. Další nevýhodou je problematické kalení slabých součástí a hran, kde teplo nemůže být dostatečně odvedeno do materiálu [35, 36].

1.5.4 Navařování laserem

Navařování vrstev se používá při opravách nebo k vytvoření vrstvy s lepšími vlastnostmi (otěruvzdornost, korozivzdornost), než má základní materiál (obr. 24). Jedná se o nejlepší způsob navařování vrstev materiálu. Principem navařování je přivádění přídavného materiálu do laserového paprsku, který se nataví a dopadne na povrch materiálu, který je od laserového paprsku také částečně natavený. Je možné materiál navařit i na tvarově složité součásti. Navařená vrstva se vyznačuje vysokou kvalitou bez trhlin a jiných defektů. Vlivem vysoké ochlazovací rychlosti je výsledná struktura jemnozrnná. Do základního materiálu se přivádí oproti jiným technologiím navařování, velmi málo tepla a proto téměř nedochází k tepelným ovlivněním a deformacím. Touto metodou lze navařovat i gradované struktury s odlišnými vlastnostmi jednotlivých vrstev. Lze navařovat různé materiály (kovy, keramiku i polymery). Přídavný materiál je převážně v podobě prášku, ale může být i ve formě drátu. Doprava přídavného materiálu ve formě prášku, je buď bočními tryskami nebo koaxiální tryskou (obr. 25). Drát je dopravován z boku, ale existuje i varianta kdy je drát přiváděn středem přes výstupní trysku. Pro navařování materiálu se převážně používá diskový, vláknový nebo diodový laser. Podle stupně promíšení základní a přídavného materiálu se rozlišují varianty navařování, nejčastěji je požadováno navaření vrstvy s lepšími vlastnostmi, než má základní materiál, poté je promíšení materiálů nežádoucí [37, 38].



Obr. 24 Princip navařování [38].



Obr. 25 Navařování pomocí koaxiální trysky [37].

1.5.5 Pájení laserem

Laserové pájení se provádí převážně pomocí diodových laserů. Tato aplikace se hojně využívá v automobilovém průmyslu, kde je výhodou malé vnesené teplo do základního materiálu, které nezhorší korozní odolnost jako při svařování. V dnešní době se laserové pájení v automobilovém průmyslu poměrně rozšiřuje a nahrazuje některé dříve svařované díly. Další možnou aplikací je pájení řezných destiček na obráběcí nástroje nebo pájení elektronických komponentů. Povrch pájeného spoje je hladký a nevyžaduje dodatečné práce. Vysoká hustota laserového paprsku umožňuje pájení vysokými rychlostmi [39].

1.5.6 Vrtání laserem

První aplikací průmyslového laseru bylo vrtání diamantu, toto využití laseru zůstalo až do dnes. Právě těžko obrobitelné materiály jako je diamant, je typickým příkladem pro laserové vrtání, ale vytvářejí se i otvory do běžných materiálů. Lze vytvářet otvory s vysokým sklonem k povrchu materiálu a s vysokým poměrem hloubky a průměru otvoru, které jsou jinak téměř nevyrobitelné. Průřez otvoru je většinou kruhový, ale lze vyrobit téměř jakýkoliv tvar. Průměr otvoru lze libovolně měnit, což je velkou výhodou oproti jiným metodám výroby otvorů. Tloušťka materiálu s otvorem může být až 50 mm, ale při vyšších tloušťkách materiálů se zhoršuje tvar a povrch otvoru. Nejčastěji se používají pulsní pevnolátkové lasery, ale i CO₂ lasery [40, 41].

1.5.7 Ostatní aplikace laseru

Existuje řada dalších možných použití laseru v průmyslu.

Čistící lasery

Používají se např. k přípravě povrchu před lepením nebo lakováním, odmaštěním a dokonce i pro restaurátorské práce.

Laserový 3D tisk

Je využíván především v prototypové výrobě. Tímto způsobem lze vytvářet složité výrobky z kovů. Podstatou je spékání kovového prášku laserovým paprskem po tenkých vrstvách. Jednou z dalších variant laserového 3D tisku je pomocí laserové hlavy, do které je koaxiální tryskou přiváděn kovový prášek, čímž se vytváří vrstva tloušťky několik setin milimetru a přesně určenými průjezdy se vytváří 3D těleso [17, 42].

Třískové obrábění s využitím laseru

Využívá se u těžko obrobitelných materiálů. Laserový paprsek ohřívá materiál před břitem, z důvodů následné lepší obrobitelnosti materiálu [17].

Laser Shock Peening

Je to poměrně nová aplikace laseru, jedná se o povrchovou úpravu materiálu. Pomocí vysoké intenzity záření (10^8 W.cm^{-2}) a velmi krátkých pulsů (řádově ps) se vytvoří rázové vlny, které působí na povrch materiálu, kde se vytvoří tlaková napětí. Dosáhne se výrazně vyšší únavové pevnosti, při cyklickém namáhání součásti a omezení vzniku trhlin v povrchové vrstvě (do 0,1 mm) [17].

V samostatné kapitole bude podrobně popsáno laserové gravírování a mikroobrábění.

2 LASEROVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ A GRAVÍROVÁNÍ

Laserový paprsek je velmi univerzální a bezkontaktní nástroj využitelný v mnoha různých odvětvích od lékařských účelů přes využití v průmyslu až po vojenské aplikace. Laserové gravírování a mikroobrábění je jen úzkou oblastí průmyslových laserů. Jednotlivé aplikace v různých oblastech použití laserů se liší především ve výkonu laseru. Pro laserové mikroobrábění a gravírování se používají výkony na spodní hranici průmyslových laserů. Dalším kritériem je zpracováváný materiál, který přibližně určuje typ laseru s určitou vlnovou délkou, tak aby docházelo k účinné absorpci laserového paprsku materiálem. Gravírování jako značení a popisování se využívá pro široký rozsah materiálu (kovy, dřevo, sklo, plasty, kůže a další), laserové mikroobrábění se využívá především pro kovy, keramiku, sklo a plasty. Laser je možné za určitých podmínek použít pro jakýkoliv materiál a proto i laserovým gravírováním a mikroobráběním lze zpracovávat i další materiály [17, 43].

Rozdíly mezi laserovým gravírováním a mikroobráběním

Pojem gravírování je obecně používaný pro vytváření nápisů, log nebo ornamentů odebráním materiálu, laserové gravírování je jen jednou možnou variantou jak lze gravírovat. Laserové gravírování se nejčastěji používá pro označování a popisování výrobků. Podstatou je odebrání tenké vrstvy materiálu zasaženého laserovým paprskem. Laserové gravírování je v dnešní době často používané díky jeho výhodám a použitelnosti pro libovolné materiály.

Při mikroobrábění dochází k odstraňování materiálu poměrně malých objemů. Často i z obrobků miniaturních rozměrů, což v dnešní době, kdy je tendence miniaturizace, velkou výhodou a je to ji jedna oblast použití laserového mikroobrábění. Také pojem mikroobrábění je použitelný i pro další způsoby obrábění nejen pomocí laseru. U laserového mikroobrábění je důležitá především přesnost, povrch obrobeného materiálu a míra tepelného ovlivnění. Používá se v oblastech výroby, kde běžné způsoby výroby nestačí ať už z důvodu tvarové složitosti nebo i nemožnosti výroby jiným způsobem. Tyto výrobky mohou být z odvětví typicky strojírenských, široká oblast je i z mikroelektroniky, ale i výrobků používaných v lékařství [17, 43, 44].

Gravírování i mikroobrábění mají společný rys a to odebírání materiálu, ale pojem gravírování je používaný převážně pro značení a popisování výrobků a je důležitý spíše vizuální dojem než přesnost a množství odebraného materiálu, kdežto u laserového mikroobrábění je podstatný objem odebraného materiálu, drsnost povrchu a přesnost, ať to je při mikro řezání, mikro vrtání nebo 3D laserovém obrábění. Typickým rysem laserového gravírování a hlavně mikroobrábění je pulsní režim a použití skenovacích hlav.

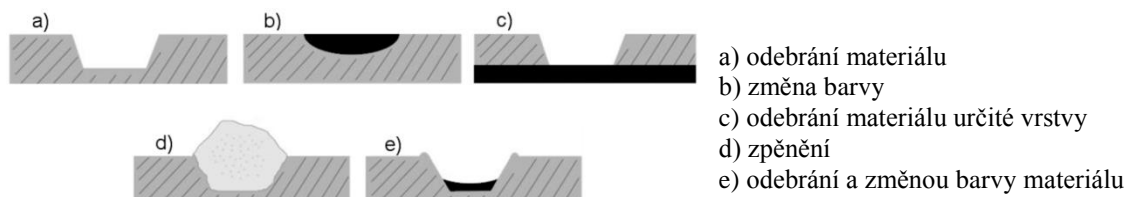
2.1 Laserové gravírování a značení

Vlastnosti laseru dělají z laserového gravírování účinný, rychlý, přesný a efektivní nástroj pro značení a popisování výrobků, časté je také použití pro dekorativní účely. Vytvořená značka nebo gravírovaná vrstva laserem má dlouhou trvanlivost a odolnost proti poškození. Tyto výhody postupně vytlačují dříve používané způsoby popisování a značení v průmyslu. Dále jsou uvedeny možnosti gravírování a značení:

- rytí pomocí dlát různých tvarů a velikostí, jedná se o nejstarší gravírovací metodu, jde o velmi pracný způsob gravírování,
- pro značení je možné použít razníky, je to jednoduchá, rychlá a levná metoda, ale vhodná pro značení pouze měkkých materiálů,

- mikro úderové značení spočívá v cyklickém vtlačování kaleného hrotu pomocí stroje, který vede tento nástroj po požadované dráze a zajišťuje pohyb nástroje,
- tiskařské stroje, které nanášejí na povrch materiálu inkousty a barvy,
- chemická metoda (odleptání) vytvoří v povrchu reliéf nebo může dojít ke změně barevnosti povrchu materiálu,
- gravírování je možné také provádět pomocí vysokootáčkových frézek, kde nástroj má průměr okolo jednoho milimetru nebo i méně,
- elektroerozivní způsob obrábění je další způsob, jakým se může do materiálu vytvářet reliéf nebo značky.

Laserové gravírování je možné použít pro libovolný materiál, jediným omezením je použití vhodného typu laseru, tak aby absorpce laserového záření daným materiálem byla dostatečná. Mezi nejčastější materiály v této oblasti použití patří dřevo, papír, sklo a plasty, nejvyšší absorpce záření těchto materiálů je plynovým CO₂ laserem. Naopak u kovů je tímto laserem většina záření odražena a proto se pro kovy a některé plasty nejčastěji používá pevnolátkový Nd:YAG laser. Výkon laseru se pohybuje od jednotek do stovek wattů podle materiálu a aplikace, v pulsním režimu je důležitý špičkový výkon. Nastavené parametry ovlivňují především hloubku odebrané vrstvy materiálu a míru tepelně ovlivněné vrstvy. Gravírovací lasery je možné použít i pro řezání tenkých fólií různých materiálů nebo papíru. Gravírování a značení laserem je rychlé z důvodu vysoké rychlosti pohybu paprsku, který nejčastěji vystupuje ze skenovací hlavy, rychlost kterou se může paprsek pohybovat po povrchu materiálu je až několik metrů za sekundu, nevýhodou je omezený pracovní rozsah. Na kvalitě gravírovaného nebo značeného povrchu závisí velikost stopy laserového pulsu a míra překrytí jednotlivých pulsů [44, 45]. Na obrázku 26 jsou možné způsoby gravírování a značení.



Obr. 26 Způsoby gravírování a značení [45].

Odebrání materiálu v určité šířce a hloubce, v závislosti na použitých pracovních parametrech laseru je na obrázku 26 a). Laserový paprsek vytvoří viditelný reliéf. Tato metoda je použitelná pro jakýkoliv materiál.

Znázornění změny barevnosti v místě interakce laserového paprsku s povrchem materiálu je na obrázku 26 b). Této možnosti je možné využít i u ocelí, které od teploty 600 °C začínají měnit barvu (kalící teploty), podle použitého výkonu laseru dojde k ohřátí a zároveň ke zbarvení povrchu.

Znázornění odebrání tenké vrstvy materiálu, barevně odlišné od základního materiálu je na obrázku 26 c), tímto se zaručí vysoký kontrast. Tato metoda je používána u povlakovaných kovů, např. eloxovaný hliník nebo u plastů (tlačítka s nápisy).

Zpěnění materiálu je další způsob zviditelnění plochy v místě dopadu laserového paprsku znázorněný na obrázku 26 d). Tento způsob je používán u plastů, u kterých dojde ke zpěnění a převýšení nad okolní povrch, může dojít i ke změně barvy zpěněného materiálu.

Kombinace metody *a)* a *b)*, kde dojde zároveň k odebrání materiálu a změně barvy materiálu v místě dopadu paprsku je na obrázku 26 e) [45].

Základní parametry laserů pro gravírování a značení jsou:

- velikost pracovní plochy (dána skenovací hlavou),
- rozlišení v DPI (dots per inch – počet bodu na palec),
- maximální pracovní rychlost.

2.2 Interakce laserového paprsku s materiálem

Laserový paprsek je charakteristický vysokou intenzitou záření na malé ploše, čímž se dosáhne vysoké rychlosti ohřátí v místě dopadu paprsku, zatímco okolní materiál zůstává bez tepelného ovlivnění. Při pohybu nebo po přerušení laserového paprsku dochází v zasaženém místě k rychlému tuhnutí a chladnutí. Toto platí pro kontinuální nebo pulsní lasery s délkou pulsu do 10^{-6} s, u kratších pulsů dochází hlavně k vypařování a sublimaci materiálu a tepelně ovlivněná oblast se se zkracující délkou pulsu zmenšuje. Při interakci paprsku s materiálem je důležitá míra absorpce, která je ovlivněna optickými a tepelnými vlastnostmi materiálu a hlavně použitým laserem s určitou vlnovou délkou. V oblasti mikroobrábění a gravírování, kdy se dosahuje vysokých špičkových výkonů, dochází k anomální absorpci a laserový paprsek je pohlcován materiálem výrazně lépe [1, 15, 43, 46].

Materiál (kov) v místě dopadu paprsku se začne ohřívat, může dojít až k natavení, vypařování nebo sublimaci materiálu a vzniku plazmatu (obr. 27). Odpařený materiál a plazma snižují výkonovou hustotu paprsku, protože částečně pohlcují laserový paprsek a také dochází k jeho rozptylu. Částečně lze tento problém vyřešit stlačeným plynem, přiváděného do místa styku laserového paprsku a povrchu materiálu. Kráter, který vytvoří laserový puls má obvykle průměr do 100 μm a hluboký je několik mikrometrů, záleží na parametrech laserového paprsku a na pracovních parametrech laseru. Chování materiálu po interakci s laserovým paprskem se také liší podle druhu materiálu, každý materiál na laserový paprsek reaguje odlišně [15, 17, 46, 47].



Obr. 27 Interakce laserového paprsku s materiálem [47].

Dále jsou uvedeny způsoby odstranění materiálu závislé především na intenzitě laserového paprsku:

- materiál je natavený a k odstranění taveniny dochází převážně stlačeným plynem,
- při vyšších intenzitách záření dochází k vypařování materiálu a částečně je materiál (tavenina) odstraněna expanzí par materiálu,
- při vysokých intenzitách záření a krátkých pulsech dochází převážně k sublimaci materiálu.

Zda dojde pouze k ohřátí materiálu nebo až k jeho sublimaci, záleží na výkonové hustotě laserového paprsku, jeho fokusaci, ale také na délce pulsu. Tohoto využívají různé aplikace

laserů, kalením dochází pouze k ohřátí poměrně velké plochy, u vrtání je paprsek fokusován na velmi malou plochu s vysokou hustotou výkonu, kde dochází hlavně k vypařování a sublimaci materiálu. V tabulce 5.1 je rozdělení podle hustoty výkonu, jsou uvedeny příklady použití a proces, který vzniká při interakci laserového paprsku s materiálem po určitou dobu.

Tab. 5.1 Příklady použití podle hustoty výkonu a délky pulsu [49].

Proces	Ohřátí	Tavení	Tavení a vypařování
Hustota výkonu	$3 \cdot 10^3 \text{ W/cm}^2$	10^5 W/cm^2	10^6 W/cm^2
Délka interakce	s	ms	ms
Použití	Kalení, pájení	Kondukční sváření	Penetrační sváření
Proces	Vypařování	Vypařování a ionizace	Sublimace
Hustota výkonu	10^8 W/cm^2	10^9 W/cm^2	10^{12} W/cm^2
Délka interakce	ms - ns	ns	ps - fs
Použití	Vrtání	Ablování a gravírování	Strukturování

Čím kratší je laserový puls, tím dochází k menšímu tepelnému ovlivnění materiálu. Při dosažení délky pulsu okolo 10 ps (v závislosti na materiálu) nedochází k přenosu tepla z roztaveného a sublimovaného materiálu do okolního materiálu, toto je podstata mikroobrábění s ultrakrátkými pulsy.

Teoretická hloubka krátera vzniklá po zasažení povrchu materiálu laserovým pulsem lze přibližně spočítat dle vztahu (2.1):

$$z = \delta \times \ln\left(\frac{\Phi}{\Phi_{th}}\right), \quad (2.1)$$

kde: z [μm] je teoretická hloubka krátera,

δ [μm] je hloubka penetrace záření,

Φ [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] je hustota špičkové energie,

Φ_{th} [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$] je hraniční hustota energie [43, 48].

Tato teoretická hloubka platí pro kráter s konstantní hloubkou a ostrými hranami [43, 48].

2.3 Laserový paprsek

Jedinečné vlastnosti dělají z laserového paprsku výjimečný nástroj již od svého prvního použití a postupným vývojem došlo až na použití laseru v oblasti mikroobrábění. Hlavní charakteristika laserového paprsku je vlnová délka. Dále jsou popsány charakterizující parametry laserového paprsku:

- příčné rozložení intenzity v paprsku (popsáno v kapitole 1.2.4 *Příčné rozložení intenzity záření – mód*),
- M^2 popisuje jak velká je odchylka od ideálního tvaru paprsku tj. Gaussovy křivky, nabývá hodnot větších jak 1,
- K-číslo vyjadřuje stejné co M^2 , liší se pouze v číselném vyjádření, nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž hodnota 1 je ideální tvar paprsku (M^2 je převrácenou hodnotou k-číslo),
- BPP (beam parameter product) tento parametr je používán pro definování kvality laserového paprsku (někdy i M^2) [9, 13].

Výpočet BPP (2.2):

$$BPP = \frac{\omega \times \theta}{2} = \frac{\lambda}{\pi} \times M^2, \quad (2.2)$$

kde: BPP [mm.mrad] beam parameter product,

ω [mm] je průměr ohniska,

θ [mrad] je úhel divergence,

λ [mm] je vlnová délka,

π [-] je Ludolfovo číslo,

M^2 [-] je parametr charakterizující laserový paprsek [9].

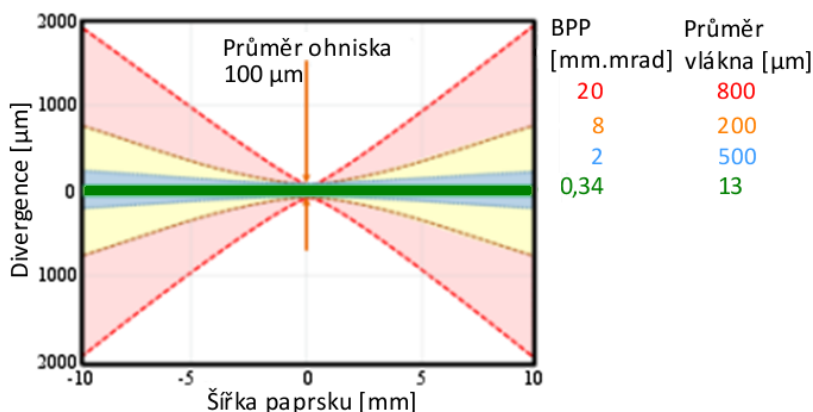
BPP a M^2 parametry jsou přesně stanoveny v normě DIN EN ISO 11145. Jak je patrné ze vzorce (2.2) s vlnovou délkou souvisí schopnost laserový paprsek fokusovat do ohniska, obecně lze uvést, že čím je vlnová délka kratší, tím lze dosáhnout zaostření paprsku na menší plochu (stopu laserového paprsku) a také čím je průměr ohniska menší, tím je intenzita záření vyšší. Průměr ohniska také souvisí s ohniskovou vzdáleností, čím je ohnisková vzdálenost kratší, tím lze dosáhnout menšího průměru ohniska. Pro gravírování a mikroobrábění se často používají skenovací hlavy, kde ohnisková vzdálenost je poměrně velká. Fokusování paprsku do bodu je pouze teoretický předpoklad, laserový paprsek má Gaussovo rozložení intenzity záření a proto ohnisko má určitý průměr (plochu) a také vzniká tzv. pas, kde laserový paprsek tvoří téměř válec a záření je zde téměř rovnoběžné (obr. 28). Polovina výšky tohoto válce, je někdy nazývána jako rayleigh lenght, která určuje hloubku ostroty [9, 17, 49].



Obr. 28 Fokusace paprsku [9].

Parametry M^2 a BPP jsou dány typem a konstrukcí laseru, především optickými komponenty a průměrem optického vlákna (na obrázku 29 je znázorněna hodnota BPP s konkrétními hodnotami, v závislosti na průměru optického vlákna). Podstatnou roly zde

hraje i chlazení, vláknové, diskové a innoslab lasery mají účinné chlazení a proto mají i vysokou kvalitu paprsku. Tyto parametry jsou ovlivňovány i výkonem laseru a délkou pulsu [50].



Obr. 29 Příklad závislosti BPP na průměru optického vlákna [50].

Multipaprsková technologie

Zlepšení tribologických vlastností a jiné úpravy ploch větších rozměrů pomocí ultra krátkých pulsních laserů s velmi malou stopou laserového paprsku je časově náročné. Proto se objevila nová technologie, kde je paprsek rozdělen do 16 nebo až do 144 dílčích slabších paprsků, které proces značně urychlí. Hlavním důvodem je snížení nákladů na takto upravenou plochu. Tato technologie je poměrně nová, za její výzkum se zasloužil Německý Fraunhoferův Institut ILT a dá se očekávat, že počet paprsků se na čísle 144 nezastaví [51].

2.4 Laserové pulsy

V oblasti laserového mikroobrábění a gravírování je pulsní režim nutností. Hlavním kritériem pulsu je jeho délka, která se může dostat u nejnáročnějších aplikací laserů až na hodnotu v řádech femtosekund (10^{-15} s). Délka pulsu ovlivňuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Jak bylo uvedeno v tabulce 5.1 v kapitole 2.2 *Interakce laserového paprsku s materiálem*, podle délky pulsu se liší použití laseru u různých aplikací. Pulsní režim je charakteristický vysokým špičkovým výkonem. Průměrný výkon laseru klesá se zkracující se délkou pulsu, naopak špičkový výkon roste, čehož se v mikroobrábění využívá. Na obrázku 30 je patrné, že délka pulsu má velký význam při mikroobrábění, je zde porovnání laserového vrtání s různou délkou pulsu, u prvních dvou obrázků je vidět pozůstatek taveniny, kdežto u posledního obrázku není [17, 47].



Puls 3,3 ns a 1 mJ



Puls - 80 ps a 0,9 mJ

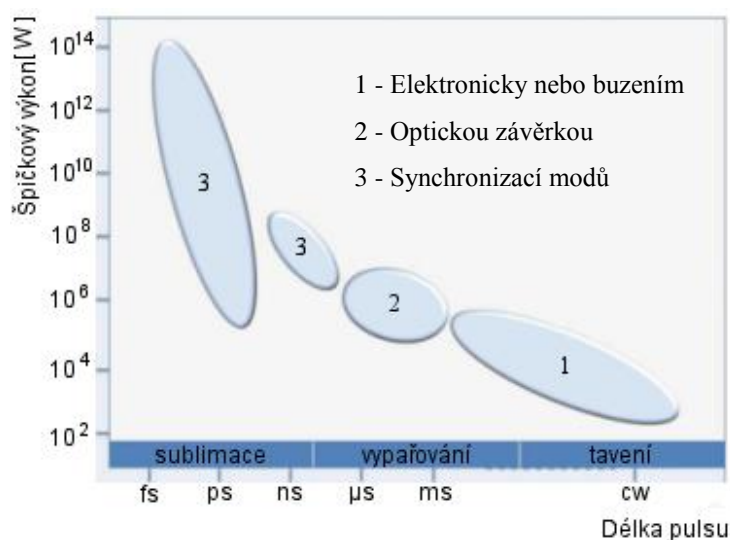


Puls - 200 fs, 0,12mJ

Obr. 30 Porovnání délky pulsu v závislosti na kvalitě otvoru [47].

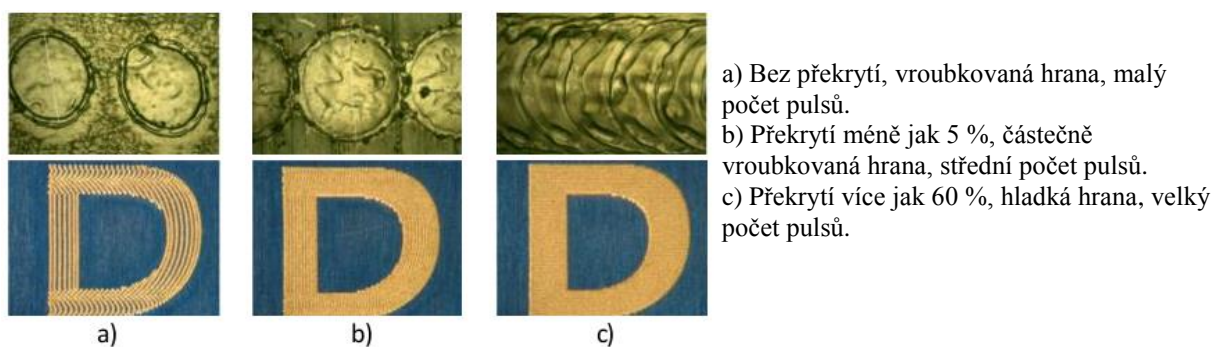
Průmyslové lasery pracují buď v pulsním nebo kontinuálním provozu. Do určité míry (délky pulsu) lze každý laser považovat za pulsní, nastaví-li se „vypínání a zapínání laserového paprsku“. Způsob, jakým dochází ke generování pulsů, záleží především na délce pulsu. Základní možnosti generování pulsu jsou (obr. 31):

- elektronickým zařízením nebo buzením aktivního prostředí zábleskovou výbojkou,
- optickou závěrkou (q-switched),
- synchronizací módu (více způsobů) [17].



Obr. 31 Způsoby generování pulsů se závislostí špičkového výkonu na délce pulsu [17].

Posuvovou rychlost paprsku po povrchu materiálu a frekvenci je nutné nastavit, podle požadavků dané aplikace, tak aby docházelo k vhodnému překrytí jednotlivých pulsů. Tato problematika je důležitá např. u mikro řezání, kde může vznikat nekvalitní hrana při malé frekvenci a vysoké posuvové rychlosti. V oblasti gravírování a značení materiálu tato problematika souvisí s výsledným vizuálním dojmem, jak je vidět na obrázku 32 [52].



Obr. 32 Rozložení jednotlivých pulsů [52].

Pro různé aplikace jako je gravírování, mikro řezání, 3D mikroobrábění povrchu nebo mikro vrtání se hodí různé rozložení intenzity záření v paprsku. Někdy se používá tzv. top-hat, kde je ve velké části paprsku konstantní rozložení intenzity záření a po obvodu prudce klesá. Průměr ohniska není vždy požadovaný co možná nejmenší, ale také záleží na konkrétní aplikaci a stejně tomu je i s tvarem ohniska. Podle příčného rozložení paprsku (mód) je také různá stopa po paprsku [9, 17, 49].

2.5 Parametry laseru

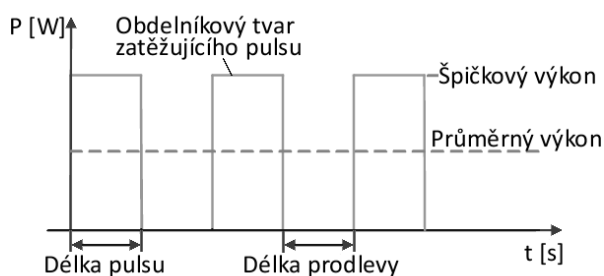
Pro mikroobrábění a gravírování je nutné zvolit vhodný typ laseru podle jeho použití a následně je velmi důležité zvolit vhodné pracovní parametry. Na obrázku 33 je znázorněn pulsní režim v závislosti okamžitého výkonu na čase [9, 17].

Mezi základní parametry dané typem laseru a jeho optikou patří:

- vlnová délka [nm, μm],
- M^2 parametr [-],
- BPP [mm.mrad],
- ohnisková vzdálenost [mm],
- tvar výstupního paprsku (stopa paprsku – kruhová, čtvercová, obdélníková...).

Parametry limitované laserem jsou:

- průměrný výkon [W],
- špičkový výkon [W],
- výkonová hustota [W.cm^{-2}],
- frekvence [Hz],
- délka pulsu [s],
- energie pulsu [J],
- energetická hustota [J.cm^{-2}],
- průměr ohniska [mm],
- rychlost pohybu paprsku [m.min^{-1}],
- průběh (tvar) zatěžujícího pulsu,
- duty [%] (délka zatěžujícího pulsu vyjádřená v procentech, vzhledem k celkové délce periody – na obrázku 33 je duty 50 %) [9, 17, 53].



Obr. 33 Pulsní režim v závislosti okamžitého výkonu na čase [9].

Vztahy pro výpočet základních parametrů.

Průměrný výkon (2.3):

$$P_{AVG} = E \times f [W], \quad (2.3)$$

kde: P_{AVG} [W] je průměrný výkon,

E [J] je energie pulsu,

f [Hz] je frekvence pulsů [53].

Špičkový výkon (2.4):

$$P_{PEAK} = \frac{E}{t} [W], \quad (2.4)$$

kde: P_{PEAK} [W] je špičkový výkon,

E [J] je energie pulsu,

t [s] je délka pulsu [53].

Hustota špičkového výkonu (2.5):

$$\Phi = \frac{P_{PEAK}}{S} [W.cm^{-2}], \quad (2.5)$$

kde: $\Phi [W.cm^{-2}]$ je hustota špičkové energie,

$P_{PEAK} [W]$ je špičkový výkon,

$S [cm^2]$ je plocha ohniska.

2.6 Materiály

Laserovým mikroobráběním a gravírováním lze vlivem vysokých špičkových výkonů zpracovávat veškeré materiály od diamantu až po polymery. Důvodem je anomální absorpce laserového paprsku materiálem, která nastává při vysokých špičkových výkonech u všech materiálů (závisí na hodnotě špičkového výkonu u konkrétního materiálu). U laserů pracujících v ultrafialové oblasti záření nastává absorpce u všech materiálů (případně v oblasti „hlubokého“ UV záření) i při běžných hodnotách výkonů. Pro odstranění materiálu může být použit stlačený plyn přiváděný do místa dopadu paprsku z důvodu odstranění taveniny, případně vznikajícího plazmatu nebo ochrany před okolní atmosférou. Častěji se ale využívá sublimace k odstranění materiálu. Dále jsou uvedeny nejčastější materiály využívané v oblasti laserového gravírování a mikroobrábění [47, 54].

Kovy

Obecně u většiny kovů se zkracující se vlnovou délkou, míra absorpce stoupá, u konkrétních materiálů se částečně liší, jak je vidět na obrázku v kapitole 1.2.5 *Absorpce laserového paprsku materiálem*. Každý kov reaguje na laserový paprsek odlišně [54].

Polymery

Reakce polymerů s laserovým paprskem je v porovnání s kovem odlišná. Odlišné je i chování polymerů po interakci s paprskem z oblasti UV nebo IR záření, s kratší vlnovou délkou se dosahuje menší tepelně ovlivněné oblasti a zároveň lepší kvality povrchu a výsledné přesnosti. Chování polymerů při laserovém zpracování je také výrazně závislé na teplotě a na konkrétním druhu polymeru [47, 54].

Sklo

Sklo má dobrou absorpci laserového paprsku u delších vlnových délek (10 μm), se zkracující se vlnovou délkou se výrazně snižuje, proto se pro gravírování používá CO₂ lasery. Případně lasery z oblasti UV záření mají dostatečnou absorpci. Ale opět je také absorpce závislá na hodnotě špičkového výkonu [17, 47].

Keramika

Při jejím zpracování a i dalších křehkých materiálů (sklo), je důležité vnesení malého množství tepla, tak aby nedošlo k pnutí v materiálu a vzniku trhlin.

Křemík

Křemík je materiál hojně se vyskytující se v oblasti elektroniky, kde je základem pro výrobu mnoha součástek. Laserové zpracování se využívá z důvodu miniaturizace těchto součástek, které by jinými metodami byly obtížně výrobitelné, často se také jedná o odstraňování vrstev nanesených na křemík [17].

2.7 Mikroobrábění s piko a femtosekundovými pulsy

Laserové mikroobrábění je často spojováno s pojmem „studené obrábění“. Pulsy laserového paprsku jsou natolik krátké, ale dostatečně intenzivní, že dojde k odstranění určitého objemu materiálu, ale nedojde k šíření tepla do okolí v místě interakce laserového paprsku s materiálem. Hranice délky pulsu, za kterou se považuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění je 10 ps, tato hranice se může měnit podle druhu materiálu a také od této hranice se označují pulsy za ultrakrátké. Lasery s ultra krátkými pulsy mohou být využívány pro řezání, vrtání, úpravu povrchu a odstraňování tenkých vrstev materiálu. Využití této technologie je nejčastěji u speciálních materiálů, výrobků nejmenších rozměrů a u aplikací ve fotovoltaiickém a elektrotechnickém průmyslu [17, 47, 55, 56].

Druh materiálu není omezený u zpracování tímto způsobem. Při velmi vysokých špičkových výkonech, kterých se zde dosahuje, nastane absorpce záření u všech materiálů. Vhodné použití je i pro sklo a keramiku a další citlivé materiály, u kterých může docházet vlivem vneseného tepla k pnutí a trhlinám. Dosahuje se vysokých přesností i kvality povrchu materiálu a proto odpadají i dokončovací operace a lze tento proces považovat za finální. U takto krátkých pulsů s vysokým výkonem se nevytváří tavenina, dochází pouze k sublimaci materiálu. Vytváří se ostré hrany, které jsou vidět na obrázku 30 v kapitole 2.4 *Laserové pulsy*, oproti nanosekundovým laserům, kde je patrný vznik taveniny a následných otřepů u hrany otvoru [43, 47, 55, 56].

Délka pulsu není jediným parametrem, který zaručí odstranění materiálu bez tepelného ovlivnění. Úběr materiálu jednotlivými pulsy je velmi malý, proto se používají frekvence v rozsahu stovek až tisíců kHz. Při takto vysokých frekvencích může s délkou pulsu několika pikosekund i tak dojít k tepelnému ovlivnění. Důvodem je vysoké překrývání jednotlivých pulsů a to až 99,9 % a proto i při takto krátkých pulsech může dojít k tepelnému ovlivnění. Z tohoto důvodu je tendence zkracovat pulsy až na hodnoty femtosekund [43, 55, 56].

Lasery

V této oblasti se používají excimerové, Ti:saphirové a Nd:YAG lasery, tyto lasery mají vlnovou délkou od UV oblasti až po délku 1 μ m. Průměrný výkon u těchto laseru se pohybuje pouze od jednotek wattů do desítek wattů, ale špičkový výkon dosahuje až stovek MW, což způsobí sublimaci materiálu v místě dopadu paprsku. Energie pulsu se pohybuje v rozmezí několika mikrojoulů až stovek milijoulů. Výstup laserového paprsku může být ze standartní laserové hlavy nebo ze skenovací hlavy [17, 47, 56].

2.8 Druhy laserů pro mikroobrábění a gravírování

Společným rysem laserů pro mikroobrábění a gravírování je kvalitní paprsek s možností zaostření na co možná nejmenší stopu (platí pro většinu mikro aplikací). Pro laserové mikroobrábění s vyššími nároky na přesnost je typické použití pevnolátkových laserů. Vlnová délka se často pohybuje v zelené části spektra záření (530 nm), kde je možno dosáhnout zaostření polovičního průměru ohniska, než tomu je u laserů s vlnovou délkou 1064 nm, ale používají se i lasery s vlnovou délkou v UV až IR oblasti. Častými představiteli laserů v mikroobrábění jsou diskové a vláknové lasery, které mají vysokou kvalitu paprsku. Mezi výrobce diskových laserů patří firma PrenovaTec nebo Trumpf. Mezi nejvýznamnější firmu ve výrobě vláknových laserů patří firma IPG, dalšími výrobci jsou SPI Lasers, JK Lasers nebo Rofin. V některých případech se používají i excimerové lasery s vlnovou délkou v UV oblasti záření např. od výrobce Coherent. Další možností je i innoslab laser, který lze také použít na

některé oblasti mikroobrábění, na tyto lasery se zaměřuje firma Edgewave. V oblasti gravírování, kde nejsou vysoké nároky na přesnost, se používají CO₂ lasery např. od firem Rofin, Coherent nebo Trumpf. U těchto laserů vlivem dlouhé vlnové délky obecně nelze zaostřit paprsek na tak malou plochu, jako u jiných laserů s kratší vlnovou délkou. CO₂ lasery se především používají k odebírání materiálu z důvodu značení [17, 19, 28, 57].

Pulsní režim je u těchto laserů nezbytný, délka pulsu je jedním z hlavních faktorů ovlivňující velikost tepelně ovlivněné oblasti, ale také jedním z hlavních parametrů určující laser. Obvyklá délka pulsu se pohybuje v řádech μ s a ns, pro náročnější aplikace v řádech ps a fs. Opakovací frekvence pulsů ovlivňuje rychlost procesu, s frekvencí také souvisí množství vneseného tepla do materiálu. U ultrakrátkých pulsů se frekvence může pohybovat až v řádech MHz, ale obvykle se pohybuje v desítkách až stovkách kHz. Průměrný výkon u těchto laserů se pohybuje v řádech desítek až stovek wattů. Nízký průměrný výkon je vyvážený vysokým špičkovým výkonem, který může dosahovat až desítek GW. S výkonem souvisí energie pulsu, která je zde v řádech μ J až mJ. Laserový paprsek je charakterizovaný hlavními dvěma parametry - BPP a M^2 , obecně čím jsou požadované nároky na aplikaci vyšší, tím musí být i kvalita paprsku vyšší [43, 57].

Součástí laserů je i software pro vytvoření programu k laserovému obrábění. U gravírování a značení je obvykle v programu uložena knihovna s mnoha druhy písmen a znaků. Loga a další tvary si uživatel vytváří sám, případně lze importovat data z jiných programů, stejně tomu je i pro mikro řezání, mikro vrtání, 3D obrábění a další operace.

Lasery mohou být v různých provedeních (obr. 34):

- samostatná laserová hlava, určena k zabudování,
- univerzální zabudované sestavy (stolní provedení, pracovní stanice),
- speciální sestavy s částečnou nebo plnou automatizací [58].



Samostatná laserová hlava



Univerzální zabudovaná sestava



Speciální sestava

Obr. 34 Různá provedení laserů [58].

2.8.1 Výstupní hlavy laserů

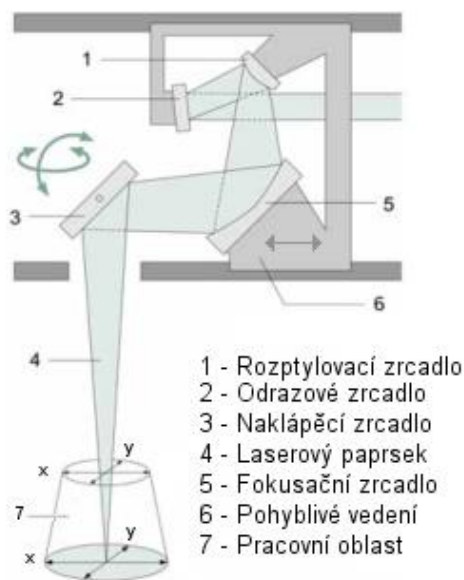
V oblasti gravírování a mikroobrábění, kde je požadovaná vysoká přesnost výsledného obrobku musí být o to vyšší i přesnost polohování paprsku vůči obrobku. Pohyb mezi laserovým paprskem a obrobkem může nastat pohybem obrobku, pohybem laserové hlavy nebo pouze pohybem paprsku (skenovací hlava), případně může nastat kombinace některých těchto pohybů zároveň. Pro laserové gravírování a mikroobrábění se používají dva základní typy hlav [9, 43].

Standartní laserová hlava

U této hlavy pohyb vykonává samotná hlava na rameni robota (obr. 1). Hlava může být i na pojezdech (princip plotru), v tomto případě se může navíc použít speciální hlava nazývaná „on the fly“, s kterou se dosahuje vyšších rychlostí obrábění. Další možností je, že pohyb vykonává obrobek na pohyblivém stole. Ohnisková vzdálenost je u této hlavy konstantní a pohybuje se řádově od několika desítek milimetrů až do stovek milimetrů. Vlivem poměrně malé ohniskové vzdálenosti může být hlava vybavena tryskou pro přívod stlačeného plynu do místa kontaktu laserového paprsku s materiálem, ať už z důvodu ochrany před okolní atmosférou nebo z důvodu odstranění roztaveného, případně sublimovaného materiálu. Paprsek dopadající na povrch materiálu je ve většině případů kolmý.

Skenovací hlava

Skenovací hlava je někdy nazývána jako rozmitací hlava nebo galvanometrický skener. Tato hlava je často používána pro laserové gravírování a mikroobrábění, ale také je používána v oblasti značení a popisování. Její hlavní výhodou je vysoká rychlost a zrychlení pohybu paprsku, toto je dáno malým objemem pohybující se hmoty optických komponentů, které mohou rychle měnit polohu. Dosahovaná rychlost je až několik metrů za sekundu. Nevýhodou je relativně malý obslužný prostor (se zvětšující se ohniskovou vzdáleností se sice obslužný prostor zvětšuje, ale klesá přesnost polohování paprsku). Ohnisková vzdálenost se zde pohybuje v řádech desítek až stovek milimetrů. Další nevýhodou je měnící se dopadový úhel paprsku na povrch obrobku (závisí na konkrétní poloze paprsku), čímž se může měnit i výsledná struktura povrchu. Důležitými parametry skenovací hlavy je rozsah ohniskové vzdálenosti a plocha, kterou může laserový paprsek zpracovávat. Podstatou skenovací hlavy je soustava optických komponentů (zrcadel), které polohují a zaostřují paprsek do daného místa. Existuje více variant skenovacích hlav, kde jsou použity různé kombinace zrcadel, různých tvarů a uspořádání. Na obrázku 35 je jedna z variant, kde dochází k zaostření paprsku pomocí zrcadel (1, 2 a 5) na pohyblivém vedení a s naklápěcím zrcadlem je paprsek nasměrován do daných x, y souřadnic [1, 9].



Obr. 35 Skenovací hlava [9].

2.9 Aplikace laserového mikroobrábění

Laserové mikroobrábění má poměrně širokou oblast použití, kde se tato technologie může využít, ať už z hlediska způsobu obrábění nebo i využití v různých odvětvích průmyslu. K širokému použití této technologie také přispívá možnost zpracování jakéhokoli materiálu. Velkou oblastí je laserové gravírování, kde laserový paprsek vytvoří reliéf, čehož se využívá při značení a popisování, někdy je tato metoda označována jako laserové 2,5 D obrábění. Využívá se v oblasti fotovoltiky, kde v dnešní době dochází k neustálému vývoji. Při použití laserového mikroobrábění v oblasti elektroniky a fotovoltiky se jedná především o odstraňování vrstev materiálu v konkrétních místech na obrobku, označováno jako scribing. Významnou oblastí jsou také výrobky z oblasti medicínského průmyslu a to především výroba stentů, kde laserové mikroobrábění zastupuje důležitou roli [17].

Ve strojírenském odvětví má laserové mikroobrábění své místo u výroby přesných otvorů velmi malých rozměrů až do průměru 1 μm a to i nekruhových průřezů, dále při dokončovacích operacích a vytváření trojrozměrné struktury např. při výrobě vstřikovacích forem v plastikářském průmyslu. Další použití je při řezání tenkých plechů, profilů nebo fólií různých materiálů. Strukturováním povrchu materiálu laserovým paprskem se zlepšuje povrch z hlediska tribologických vlastností, tato aplikace nachází uplatnění u výroby válců spalovacích motorů a tam kde je vyžadováno nízké tření.

2.9.1 Laserové mikro vrtání

Vlivem vysoké intenzity paprsku dojde k natavení a odpaření nebo až sublimaci materiálu. Otvor se vytvoří expanzí par z materiálu, které prudce zvýší objem, ale také se může vrtat s asistenčním plynem, který roztavený materiál napomáhá odstraňovat z otvoru. Laserovým vrtáním se například dělají otvory trysek inkoustových tiskáren, otvory pro vstřikování paliva do motorů nebo pro filtry. Délka pulsu je důležitá, jak je patrné na obrázku 30 v kapitole 2.4 *Laserové pulsy*, především u velmi malých a přesných otvorů. Používá se délka pulsu od několika milisekund u vrtání materiálu tloušťky několika milimetrů a průměru otvoru řádově desetin milimetru, až po nejkratší možné délky pulsu u nejpřesnějších otvorů bez tepelného ovlivnění. Existuje několik způsobů laserového mikro vrtání, tyto způsoby jsou zobrazeny na obrázku 36 [17, 40, 41].

Vrtání jednotlivými pulsy

Jediným pulsem s dostatečnou energií může dojít u tenkých materiálů k vytvoření otvoru. Délka pulsu se pohybuje od stovek μs do několika ms. Natavený materiál se odstraní vlivem vysoké intenzity záření nebo pomocí stlačeného plynu. Okolí otvoru má relativně velké tepelné ovlivnění oproti dalším způsobům vrtání [17, 40].

Vrtání pulsní (narázové vrtání, percussion drilling)

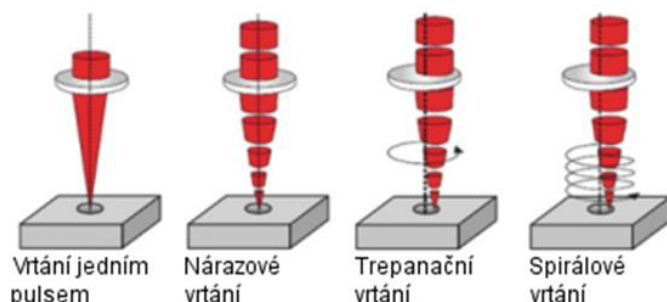
Válcový otvor vzniká více pulsy, kdy se dosahuje větší hloubky (až 10 mm) a vyšší přesnosti otvoru než při vrtání jednotlivými pulsy, také je možné dosáhnout menších průměrů. Rozsah průměrů otvorů je od 0,001 mm do 1 mm, ale záleží na materiálu a také na typu laseru. Tímto způsobem se vytvářejí otvory o průměru stejném nebo nepatrně větším než je stopa paprsku [17, 40].

Trepanační vrtání (trepanning)

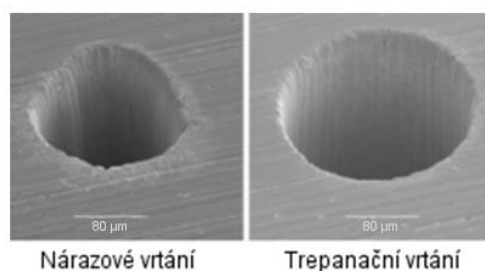
Využívá se pro větší otvory libovolného průřezu. Nejprve dojde k vytvoření otvoru předchozí metodou a poté se otvor rozšíří do stran pohybem paprsku, podobně jako tomu je u řezání [17].

Spirálové vrtání (helical drilling)

Využívá se pro větší a nejen válcové otvory. Otvor se vytváří postupným průjezdem paprsku po obvodu otvoru, dochází k postupnému úběru materiálu. Tímto způsobem lze vytvářet hluboké otvory [17].



Obr. 36 Způsoby laserového mikro vrtání [17].

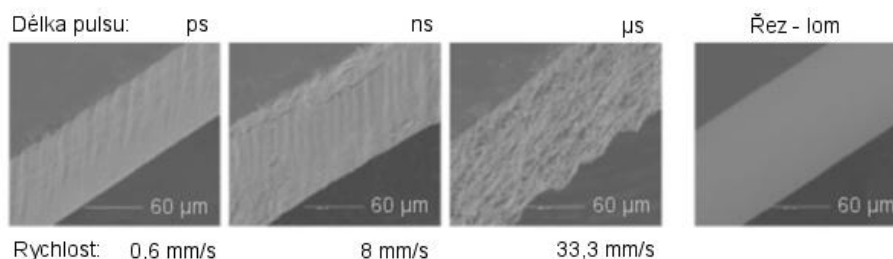


Obr. 37 Rozdíl ve válcovitosti mezi použitými metodami mikro vrtání [17].

Poslední dvě uvedené metody se přibližují procesu řezání, otvory mají lepší kvalitu a kruhovitost než uvedené první dvě metody (obr. 37), ale doba procesu je proto také delší. Trepanačním a spirálovým vrtáním lze vytvářet otvory s proměnným průřezem, kdy jedna strana otvoru má jiný průřez než druhá strana otvoru [17].

2.9.2 Laserové mikro řezání

U laserového mikro řezání je využíváno pulsního režimu s vysokou intenzitou laserového paprsku, který zajistí odstranění materiálu sublimací. Může být použit i stlačený plyn (dusík, argon a další) pro zvýšení rychlosti řezání nebo z důvodu ochrany místa řezu před okolní atmosférou. Často se sublimační řezání používá i pro nekovové a anorganické materiály. Výhodou sublimačního řezání je malá nebo dokonce žádná tepelně ovlivněná oblast. Obecně se zkracující se délkou pulsů se zlepšuje řezná plocha, řezná hrana a také dochází ke snížení rozstříku taveniny okolo řezu. Nevýhodou této metody je rychlost procesu, která je časově náročnější, při srovnání s běžným řezáním se stlačeným plynem (hlavně u řezání kovů).



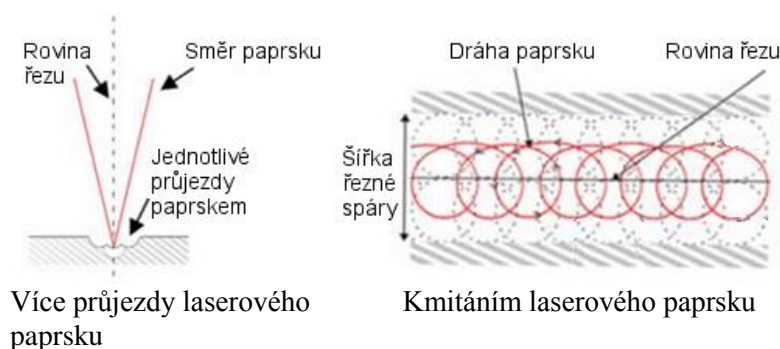
Obr. 38 Závislost kvality řezu na rychlosti řezání (délce pulsu) a srovnání s dělením materiálu lomem (vpravo) [17].

Důležitá je rychlost řezání, obecně se zvyšující se rychlostí se zhoršuje řezná hrana i povrch řezu (obr. 38). Dostatečné překrytí pulsů je dáno frekvencí a rychlostí pohybu paprsku, které musejí být optimálně nastaveny. V případě malého překrytí dochází ke vzniku nekvalitní hrany řezu a naopak při vysokém překrytí může docházet k nadměrnému množství vneseného tepla do materiálu a vzniku větší tepelně ovlivněné oblasti [17].

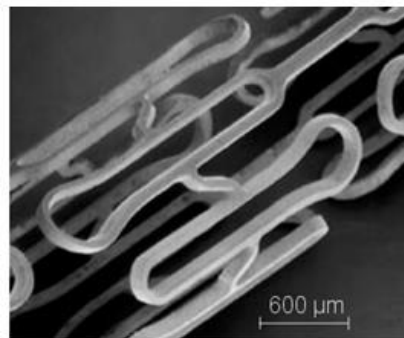
Při řezání materiálů, hlavně křehkých a tepelně citlivých materiálů existuje další způsob řezání. Jednou z možností pro dělení křehkých materiálů je způsob, kdy se vytvoří na povrchu materiálu rýha (vrub) a následně ohřátím dojde k pnutí, které způsobí lom v místě vrubu, vytvořený povrch je velmi kvalitní a má ostré hrany (obr. 38), nevýhodou je možnost použití pouze pro rovné případně jednoduché tvary řezu [17, 60, 61].

Skenovací sublimační řezání

Často se při mikro řezání využívá skenovací hlavy, které mohou řezat pouze sublimačním způsobem bez přívodu stlačeného plynu. Podle tloušťky materiálu je řez proveden jedním průjezdem paprsku (kovové fólie do tloušťky cca 0,05 mm) nebo u silnějších materiálů vícenásobným přejezdem. U těchto silnějších materiálů vzniká problém, je-li použita skenovací hlava. Musí se rozšířit řezná spára a to buď jednotlivými průjezdy paprsku vedle sebe nebo kmitáním paprsku (obr. 39). V těchto případech, kdy se rozšiřuje řezná spára, se musí zohlednit možný vznik odchylek od kolmosti stěn řezu [17, 61].



Obr. 39 Rozšíření řezné spáry [61].

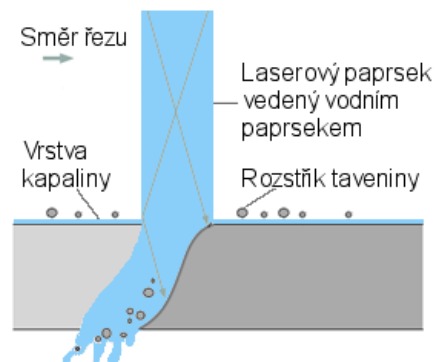


Obr. 40 Medicínský stent [49].

Jednou z aplikací sublimačního řezání je výroba chirurgických stentů (obr. 40). Jedná se o kovové trubičky ze speciálních materiálů do průměru 2 mm, s tloušťkou stěny několik desetin milimetru, které slouží pro roztahování tepen v lékařství. Jde o poměrně náročnou aplikaci, kde nesmí dojít k tepelnému ovlivnění materiálu. Také se vyžaduje, aby tato operace byla finální a nebyly potřebné dokončovací operace a proto řezné hrany i povrch materiálu musí mít dostatečnou kvalitu a být bez rozstříku taveniny. Pro tyto výrobky se používají lasery s vysokou kvalitou paprsku a s ultrakrátkými pulsy, které všechny požadavky na výrobu stentů splňují [17, 49].

Microjet

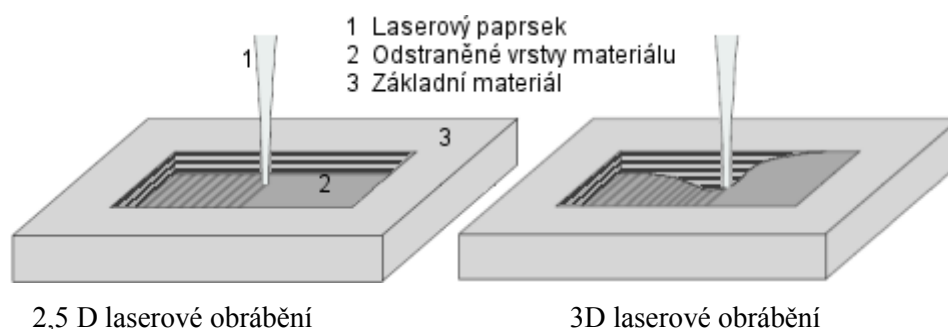
Jedná se o další způsob mikro řezání, kde je využit vodní a laserový paprsek dohromady (obr. 41). Vodní paprsek má hlavní funkci vést laserový paprsek až k povrchu materiálu, stejným způsobem jako optické vlákno pro dopravu laserového paprsku. Jeho další funkce je odvod nataveného materiálu, kde nahrazuje funkci stlačeného plynu u běžného laserového řezání. Výhodou tohoto řezání je také minimální tepelně ovlivněná oblast, z důvodu chlazení místa řezu vodním paprskem. Paprsek vody neodchází řeznou spárou v celém objemu pryč, ale část se usadí na povrchu materiálu, kde vytvoří vrstvu, která zamezí ulpění rozstříku taveniny na povrchu materiálu. Průměr vodního paprsku je 20 μm až 150 μm a po celé délce má konstantní průřez, čímž vzniká dokonale kolmá řezná hrana. Nevýhodou je nutnost speciální řezné hlavy a pracovní prostor vyhovující pro rozstřík kapaliny. Tato metoda je využitelná pro řezání polotovaru pro počítačové čipy, materiály s povlaky a pro medicínské implantáty [49].



Obr. 41 Princip microjet [49].

2.9.3 Laserové 2,5 D a 3D mikroobrábění (ablování)

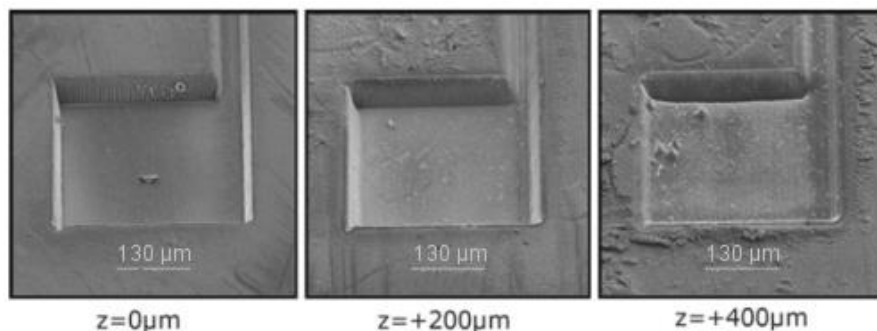
Laserový paprsek lze použít i pro vytváření tvarů v materiálu kdy nedojde k odstranění veškerého materiálu v místě působení paprsku jako tomu je u řezání nebo vrtání. Nejjednodušší použití je u značení a popisování, kdy dojde k odstranění tenké vrstvy materiálu konstantní tloušťky na rovinných nebo tvarových plochách – 2,5 D obrábění. Další možností je odstraňování materiálu vrstvu po vrstvě s proměnou tloušťkou odebraného materiálu v různých místech obrábění (závislé na počtu překrývajících se průjezdů paprsku). Vznikne tvarové vybrání s požadovanou hloubkou – 3D obrábění (obr. 42). Tento způsob je možné opět použít na rovné nebo tvarové plochy. Vrstva odebraného materiálu se může pohybovat od několika mikrometrů až po několik milimetrů [17, 43, 49, 61].



Obr. 42 Laserové obrábění [49].

Jednotlivými průjezdy vhodně uspořádanými vedle sebe a s dostatečným překrytím pulsů dochází k odstranění vrstvy materiálu. Množství odebraného materiálu závisí na velikosti stopy (ohniska) paprsku a použitých pracovních parametrech laseru, obvykle má stopa paprsku několik desítek mikrometrů v průměru a hloubku několik mikrometrů. Při tomto obrábění je v některých případech lepší použít paprsek s větším průměrem ohniska z důvodu rovnoměrnosti vznikajícího povrchu. Vznikající povrch a jeho drsnost je hlavně závislá na poloze jednotlivých průjezdů paprsku a překrytí pulsů.

V případě, že dochází k odstranění materiálu větší tloušťky, je nutné měnit ohniskovou vzdálenost, tak aby poloha ohniska kopírovala obráběný povrch. Na obrázku 43 je patrné, že s měnící se polohou ohniska se mění kvalita obrobení jak z hlediska kvality povrchu tak i ostrosti tvarů, tento problém je výraznější čím horší je parametr laserového paprsku BPP. U nízkých hodnot BPP tento problém prakticky nevzniká, protože laserový paprsek má stejné vlastnosti a průměr ohniska v poměrně široké oblasti (rayleigh lenght) [17, 49, 61].



Obr. 43 Obrábění 2,5 D s rozdílem v poloze ohniska [17].

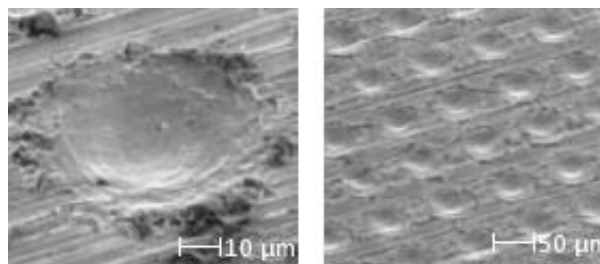
Nejčastěji se pro 2,5D a 3D obrábění používá laserů se skenovací hlavou. Případně lze i pro tento způsob laserového obrábění použít hlavy s přívodem stlačeného plynu do místa obrábění, který napomáhá odstranit roztavený materiál. Tento způsob je ale oproti skenovacímu obrábění výrazně pomalejší.

2.9.4 Ostatní aplikace laserového mikroobrábění

Existuje řada dalších mikro aplikací spočívající v odebrání materiálu pomocí laserového paprsku, který je tvořen krátkými pulsy.

Úprava povrchu

Někdy nazýváno jako strukturování povrchu, využívá se ke zlepšení vlastností povrchu materiálu z hlediska optických nebo kluzných vlastností. Zlepšení kluzných vlastností spočívá v ulpění maziva ve vytvořených kráterech (obr. 44). Kráter se vytvoří jedním nebo více pulsy podle požadované hloubky. Důležité je zachovat okolí kráteru bez poškození (rozstřík taveniny) [12].



Obr. 44 Strukturovaný povrch [12].

Scribing

Jedná se o vytváření drážek (rýh), z důvodu odstranění vrstvy materiálu v konkrétních místech nebo se této metody využívá k vytvoření vrubu, který slouží k řízenému lomu (popsáno v kapitole 2.9.2 *Laserové mikro řezání*) [17].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Laserové mikroobrábění je poměrně široká oblast s možnostmi různých způsobů obrábění, jaké byly popsány v kapitole 2.9 *Aplikace laserového mikroobrábění*. V těchto experimentech byl využit vláknový výkonový laser Yb:YAG, který se nachází v Ústavu přístrojové techniky v Brně. Experimenty spočívaly ve využití výkonového laseru pro aplikace v oblasti mikroobrábění a gravírování, jednalo se o vytváření drážek, jednotlivých kráterů, odstranění vrstvy materiálu, vrtání a to při různých pracovních parametrech. Pro tyto experimenty byla použita konstrukční a korozivzdorná ocel, křemík a sklo s karbo-nitridovou vrstvou. Materiály budou dále upřesněny v podrobném popisu jednotlivých experimentů. Bylo využito i dalších zařízení, které sloužily k přípravě a vyhodnocování vzorků.

3.1 Popis používaných strojů a zařízení

Pro provedení a vyhodnocení experimentu byly použity následující zařízení.

Laser

Hlavní zařízení tohoto experimentu byl výkonový vláknový Yb:YAG laser od firmy IPG Photonics, označení laseru je YLS 2000 (obr. 45). Laser je osazený řezací hlavou, do které je laserový paprsek dopraven pomocí optického vlákna tloušťky 100 μm . Laserová hlava je ovládána pomocí průmyslového robota. Mezi základní parametry Yb:YAG laseru patří:

- výkon 2 kW,
- vlnová délka 1070 – 1080 nm,
- kontinuální (pulsní) režim,
- maximální frekvence 5 kHz,
- minimální délka pulsu 0,001 s.

Parametry laserového paprsku ovlivňuje více faktorů (laser, laserová hlava, průměr vlákna) a proto není známá přesná hodnota u použitého laseru v experimentu. Hodnota BPP se pohybuje okolo 4 mm.mrad a rayleigh lenght je přibližně 3,5 mm. V příloze 1 jsou uvedeny hodnoty laserového paprsku pro Yb:YAG s hlavou a optickým vláknem, ale uvedené hodnoty se částečně liší od skutečných hodnot laseru použitého v experimentu (laserová hlava je jiná) [62, 67].



Obr. 45 Laser používaný v experimentu [62].

Laserová hlava

K dispozici pro tyto experimenty byla řezací hlava, kterou je možné využít i v oblasti mikroobrábění a gravírování. Použitá laserová hlava je na obrázku 1. Označení hlavy je YRC 100 od výrobce Precitec. Hlavní parametry této hlavy jsou:

- fokusační čočka 100 mm (ohnisková vzdálenost 100 mm),
- kolimační čočka 80 mm,
- průměr ohniska 100 μm .

Externí elektronické zařízení – signální generátor a osciloskop

Laser YLS 2000 je primárně určený pro kontinuální provoz, ale pomocí těchto zařízení lze laser použít i v pulsním režimu. Signální generátor od Agilent Technologies s typem 33210A poskytuje signály různých tvarů (obdélníkový, sinusoida...), kterými lze modulovat výstupní výkon. Osciloskop je také od výrobce Agilent Technologies, označení zařízení je DSO1004A. Osciloskop slouží k vizuálnímu zobrazení signálu pouštěného do laseru, záznam z osciloskopu je v příloze 2, je zde patrný obdélníkový průběh pulsu s hodnotou duty 70 %.

Průmyslový robot

Robot IRB 2400 od výrobce ABB zabezpečoval pohyb laserové hlavy. Důležitá vlastnost průmyslového robota používaného v laserovém mikroobrábění a gravírování je přesnost polohování. Použitý průmyslový robot je na obrázku 1. Používaný software pro ovládání robota je Rapid. Základní parametry robota jsou:

- přesnost polohy 0,03 m,
- přesnost dráhy 0,11 – 0,15 mm,
- počet os 6 [63].

Laserový konfokální mikroskop

Tímto laserem lze zobrazit jak 2D tak i 3D povrch materiálu a vyhodnocovat a měřit např. drsnost povrchu. Jedná se o mikroskop od výrobce Olympus s označením LEXT 3100. Mikroskop lze používat i v režimu jako běžný světelný mikroskop.

Elektronový mikroskop

Elektronovým mikroskopem jsou získány jedinečné snímky, výrobce použitého mikroskopu je Tescan, typ mikroskopu byl VEGA TS 5130 MM.

Stereo mikroskop

Tento mikroskop SZX 10 od výrobce Olympus je vhodný pro pozorování členitých objektů a pomocí počítače měřit a vyhodnocovat pořízené snímky.

Digitální fotoaparát

Pro vyhodnocení vzorků s menším zvětšením než u stereo mikroskopu lze použít digitální fotoaparát. Byl použit fotoaparát od výrobce Canon, typ EOS 40D.

Metalografická pila

Jedná se o pilu od výrobce MTH s označením Mikron 110, která je schopná dělit materiál bez tepelného ovlivnění díky intenzivnímu chlazení a nízkému přitlaku při řezání.

Metalografický lis

Metalografický lis od výrobce Struers s označením Citopress-1 je zařízení pro vytváření vzorků, na kterých se následně vytvoří výbrus a pomocí mikroskopů se vzorky zkoumají.

Metalografická leštička

Od stejného výrobce jako předešlé zařízení je i metalografická leštička s označením Tegramin-20, která slouží k výbrusu vzorků a pro následné vyhodnocování.

Drsnoměr

Bylo použito i přenosné zařízení pro měření drsnosti povrchu od výrobce Mahr a označením MarSurf M 300.

Ve všech experimentech byly použity některé stejné pracovní parametry, odstup trysky od materiálu byl vždy 1 mm, tvar zatěžujícího pulsu byl u všech experimentů obdélníkový a ohnisková vzdálenost byla 100 mm. Ostatní parametry a nastavení, které se u jednotlivých experimentů měnily, jsou vždy uvedeny u konkrétních experimentů.

3.2 Drážky v konstrukční a korozivzdorné oceli

Experiment spočíval v opakovaných průjezdech laserového paprsku po dvou různých materiálech. Na každém materiálu bylo provedeno 5 drážek s různým počtem průjezdů laserového paprsku a to postupně 1, 2, 4, 8 a 16 průjezdů (v jednom místě), čímž se vytvořily drážky různé hloubky. Cílem bylo zhodnocení vytvořených drážek a jejich změření.

• Použité materiály

Pro pokus byly zvoleny dva materiály a to konstrukční ocel dle ČSN 11 343 nebo podle značení ČSN EN udávající mechanické a fyzikální vlastnosti S235 JRG. Druhý materiál byla austenitická korozivzdorná ocel dle ČSN 17 240 a podle ČSN EN značení udávající chemické složení X5CrNi18-10. Základní vlastnosti materiálů použitých v tomto experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Tyto materiály byly používány i pro některé další experimenty [64, 65, 66].

Tab. 6.1 Základní vlastnosti materiálů [64, 65, 66].

Konstrukční ocel 11 343	Jednotky	Hodnota	Korozivzdorná ocel 17 240	Jednotky	Hodnota
Tloušťka	[mm]	3	Tloušťka	[mm]	3
Teplota tání	[°C]	1440	Teplota tání	[°C]	1380
Součinitel tepelné vodivosti (20°C)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	47	Součinitel tepelné vodivosti (20°C)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	15
Měrná tepelná kapacita	[KJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,46	Měrná tepelná kapacita	[KJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,5

• Provedení experimentu

Při tomto experimentu byly nejprve hledány optimální pracovní parametry tak, aby docházelo k odstranění materiálu, ale nedocházelo k nadměrnému rozstříku taveniny okolo drážky. Kritérium pro nastavení pracovních parametrů bylo hlavně podle rozstříku taveniny okolo drážky a množství odstraněného materiálu. Špičkový výkon byl hlavním pracovním parametrem, který byl regulován, tak aby bylo dosaženo odpovídajících drážek.

V příloze 3 jsou jednotlivé obrázky postupu experimentu. Při hledání pracovních parametrů a nastavené hodnotě špičkového výkonu 240 W se výrazně zvýšil rozstřík taveniny u obou materiálů, což bylo pravděpodobně způsobeno rozdílnou absorpcí laserového záření materiálem. Byly zvoleny pracovní parametry, které jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab. 6.2 Zadané a vypočtené hodnoty pracovních parametrů.

Pracovní parametry	Jednotky	Hodnota
Špičkový výkon	[W]	200
Průměrný výkon	[W]	140
Hustota špičkového výkonu	[MW.cm ⁻²]	2,55
Frekvence	[Hz]	300
Délka pulsu	[s]	0,0023
Energie v pulsu	[J]	0,47
Duty	[%]	70
Rychlost posuvu	[mm.s ⁻¹]	20
Překrytí pulsu (délkové)	[%]	33,3
Tlak stlačeného plynu	[bar]	4
Druh stlačeného plynu	[-]	Vzduch
(zadaná hodnota)		
(vypočtená hodnota)		

• Vyhodnocení experimentu

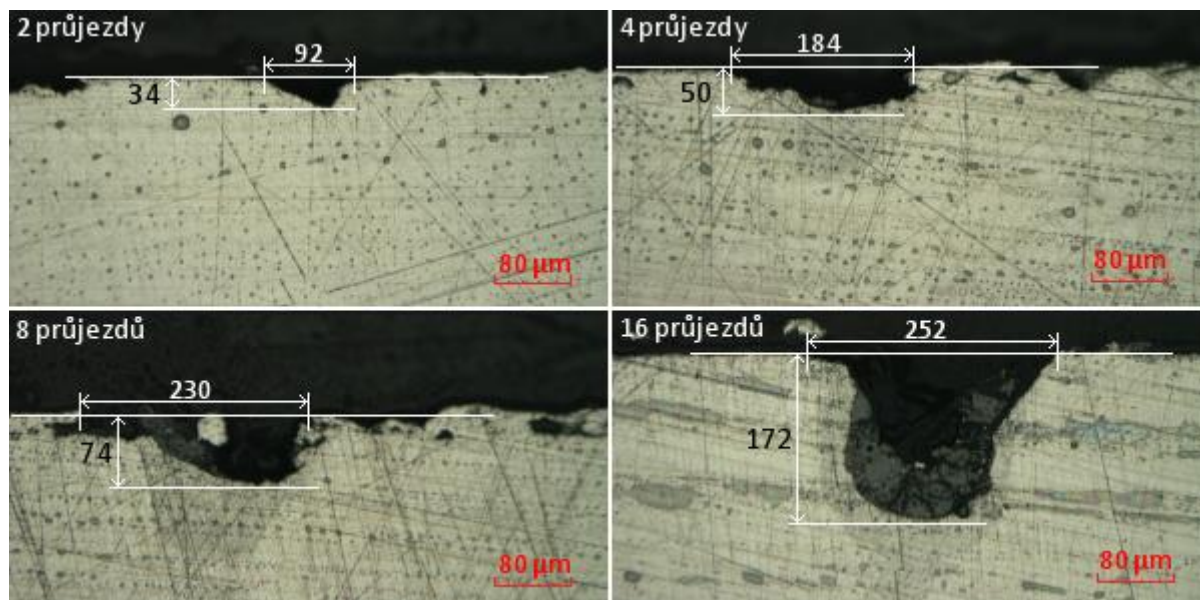
V experimentu bylo vytvořeno 5 drážek ve dvou různých materiálech, vyhodnocování probíhalo pomocí několika zařízení.

Snímky z laserového konfokálního (světelného) mikroskopu

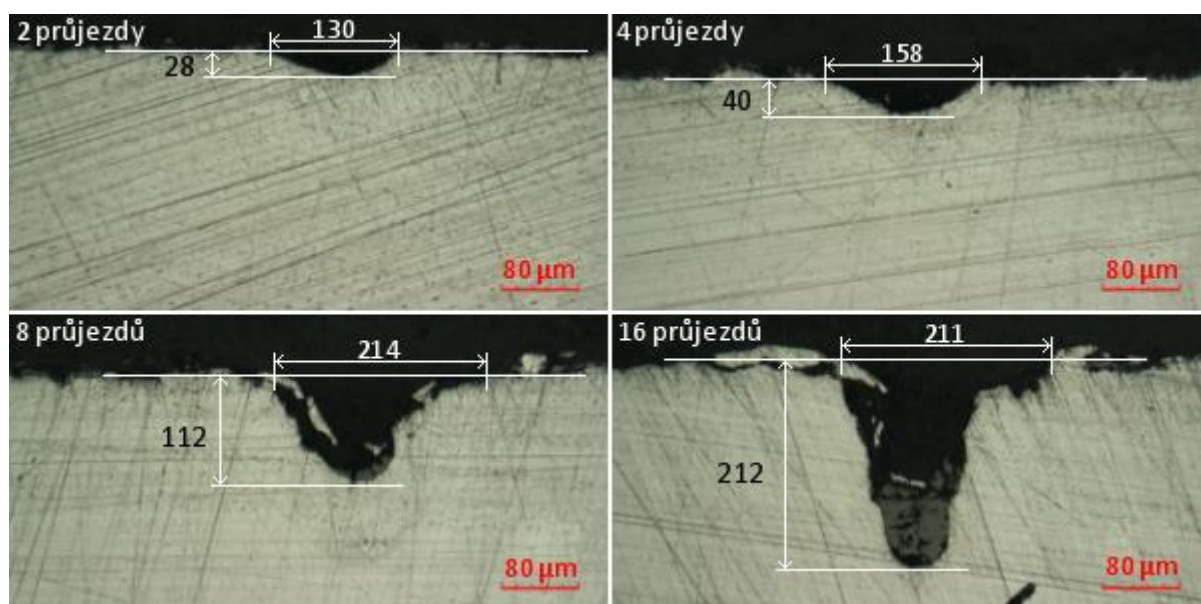
První vyhodnocení bylo pomocí laserového konfokálního mikroskopu, kdy byl nejprve proveden řez vzorkem pomocí metalografické pily s malým přtlakem a dostatečným chlazením, tak aby nedošlo k poškození vzorku. Následně byly tyto nařezané vzorky zalisovány, a poté byly pomocí metalografické leštičky vybroušeny. Při výbrusu byly použity pouze dva brusné papíry (proto horší povrch výbrusu). Následně bylo provedeno vyhodnocení a pořízení snímků všech drážek pomocí mikroskopu se 480ti násobným zvětšením. Jelikož je tímto způsobem zobrazen pouze řez, byla získána poměrně nízká vypovídající hodnota o celkovém tvaru drážky. Drážka vytvořená pouze jedním průjezdem byla nepatrná a vlivem poměrně nerovného povrchu materiálu byla špatně rozpoznatelná, proto jsou obrázky 46 a 47 pouze s 2, 4, 8 a 16 průjezdy laserového paprsku.

Z obrázků 46 a 47 je patrné, že na oba tyto materiály působí laserový paprsek odlišně, jak z hlediska hloubky, šířky tak i tvaru drážky. Jedním z důvodů může být odlišná absorpce laserového paprsku u obou materiálů, vlivem odlišné drsnosti povrchu a jiných optických vlastností povrchu. Dalším důvodem může být i odlišná tepelná vodivost, která je u konstrukční oceli až 4x vyšší než u korozivzdorné oceli.

Vzhledem k poměrně nízké hodnotě překrytí pulsů, která je 33,3 %, je drážka poměrně nepravidelné hloubky s vlnitým dnem, zvláště v případě drážek s jedním a dvěma průjezdy laserového paprsku. Důvodem je náhodná poloha řezu (výbrusu) ve drážce. Pro přesnější vyhodnocení by bylo potřeba udělat více řezů s měřením a tyto výsledky zprůměrovat nebo měřit tyto rozměry jinou metodou.



Obr. 46 Drážky v konstrukční oceli s různým počtem průjezdů s uvedenou hloubkou a šířkou v μm.



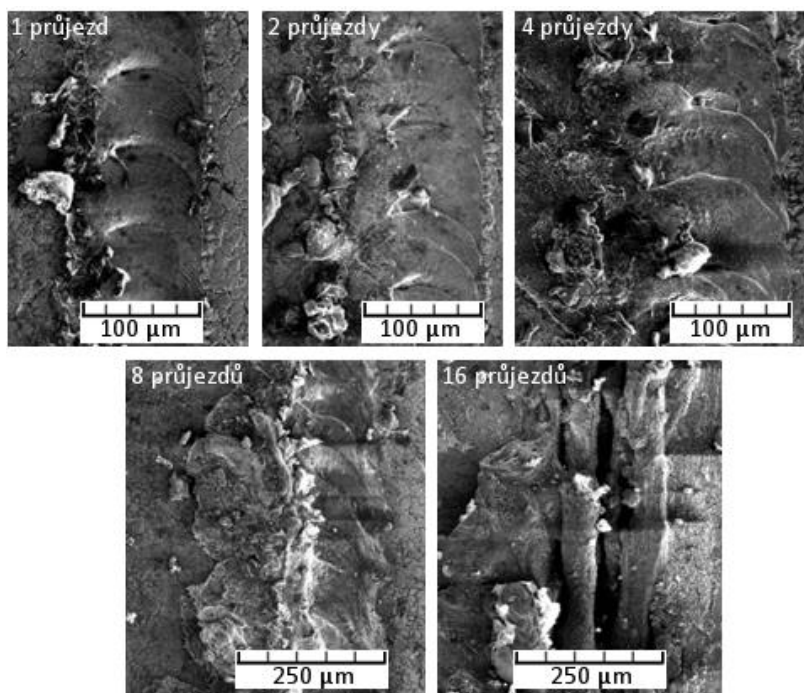
Obr. 47 Drážky v korozivzdorné oceli s různým počtem průjezdů s uvedenou hloubkou a šířkou v μm.

Zvláště u drážek s 16 průjezdy laserového paprsku u obou materiálů jsou ve spodní části drážky patrné zbytky přetaveného materiálu, který nebyl odstraněn z drážky. Je patrné, že kdyby se tímto způsobem měla vytvořit ještě hlubší drážka, velká část laserového paprsku bude absorbována těmito zbytky neodstraněného materiálu a nebude docházet k výraznému prohlubování drážky. U obrázků 46 a 47 s 8 průjezdy u obou materiálů už jsou patrné na dně zbytky přetaveného neodstraněného materiálu, proto už následné průjezdy laserovým paprskem byly z části absorbovány těmito zbytky.

Snímky z elektronového mikroskopu

Pro názornější zobrazení tvaru drážek byly pořízeny snímky pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (obr. 48), ale pouze u korozivzdorné oceli. Snímky z elektronového mikroskopu s dalším zvětšením stejných drážek jsou v příloze 4. Šířka drážek nebyla změřena, protože zde nejsou jasné okraje drážek. Na snímcích je patrná přítomnost ztuhlé taveniny, což je důsledkem způsobu vytváření těchto drážek (odstranění materiálu stlačeným plynem). Na snímku s pouze jedním průjezdem laserového paprsku jsou patrné stopy po jednotlivých pulsech, také u tohoto snímku je patrné jejich překrytí. Poměrně malé překrytí pulsů (33,3%) vytváří nerovnoměrnou hloubku drážky (v místě překrytí dojde k odstranění více materiálu).

Na všech snímcích je patrné, že pouze jedna strana drážky je „ostrá“, ale u druhé strany je množství ztuhlé taveniny a není zde ostrá hrana. Jednou z možných příčin je špatný mód laserového paprsku. Se stoupajícím počtem průjezdů se „ostrá hrana“ zhoršuje, jedním z důvodů je i nepřesnost polohování laserové hlavy, kdy se dráha při každém průjezdu nepatrně liší. Na snímcích ze SEM se jeví, že jedna strana vedle drážky je výrazně převýšená, ale snímky ze světelného mikroskopu v řezu na obrázku 47 toto nepotvrzují. U drážky se 16 průjezdy laserového paprsku, je drážka velmi členitá a tímto způsobem nelze dále drážku prohlubovat.

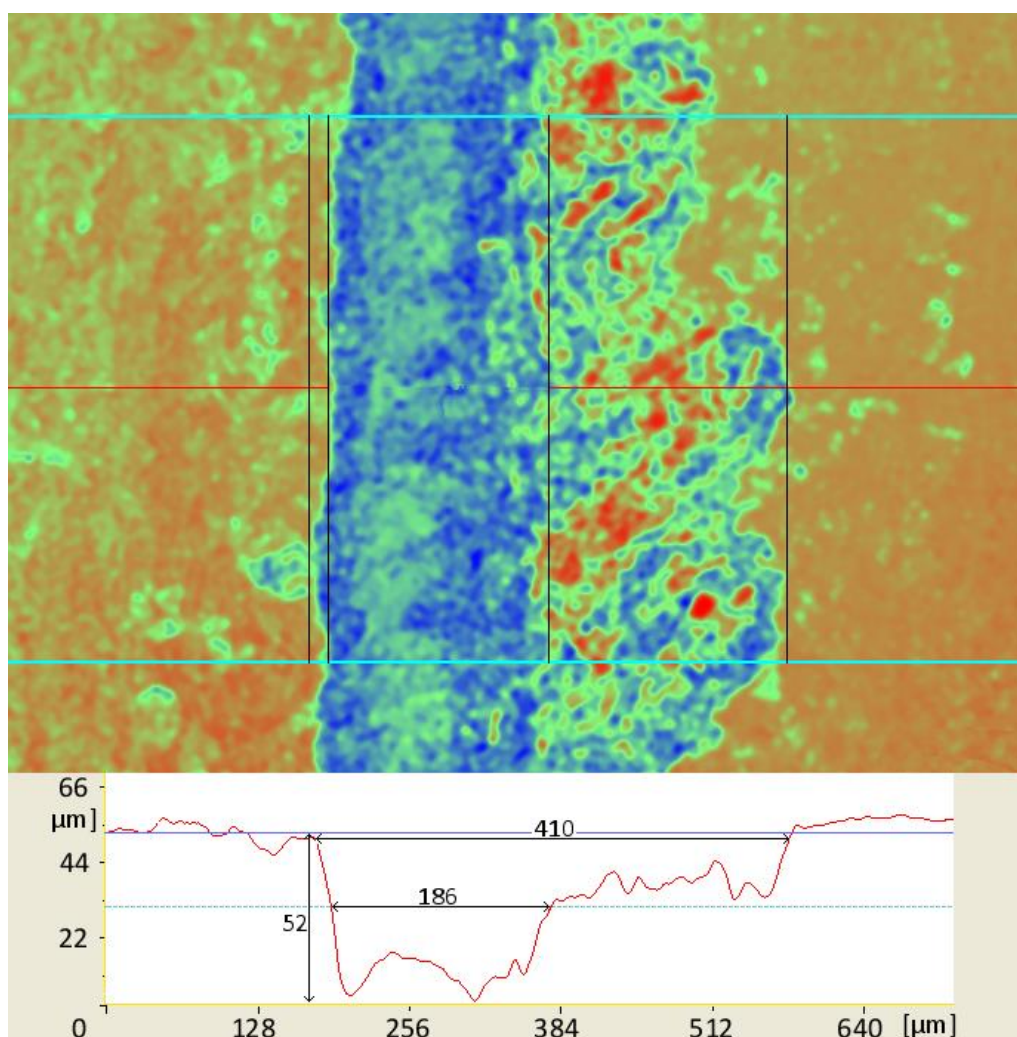


(zvětšeno 100x – 8 až 16 průjezdů, ostatní zvětšeny 200x)
Obr. 48 Snímky ze SEM korozivzdorné oceli jednotlivých drážek

Zobrazení 3D profilu drážky pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Tento způsob vyhodnocení byl proveden pouze u korozivzdorné oceli s 8 průjezdy laserového paprsku. Na obrázku 49 je zprůměrovaný profil drážky ze 400 μm (oblast mezi zelenými čarami), z tohoto profilu je patrná nesymetričnost drážky, kde na jedné straně drážky je téměř kolmá strana, kdežto na druhé straně je značná nerovnoměrnost, což je patrné i na obrázku 48 z elektronového mikroskopu. Na obrázku 49 došlo pravděpodobně

k chybnému vyhodnocení (profilu drážky) konfokálním laserovým mikroskopem, jelikož při porovnání snímků z elektronového mikroskopu (obr. 48) a obrázku 49 není možné, aby došlo v oblasti vedle hlavní drážky k odstranění materiálu do stejné hloubky jako u hlavní drážky (stejný odstín modré barvy tzn. stejná hloubka). Naopak podle snímku z elektronového mikroskopu se jeví, že v této oblasti jsou zbytky ztuhlého materiálu, který je převýšený nad okolní materiál, tato úvaha je i z části podpořena obrázkem 49, kde jsou v této oblasti „ostrůvky“ s výrazně tmavší barvou (červená) než je okolní rovinná plocha materiálu.



Obr. 49 Profil drážky v korozivzdorné oceli s 8 průjezdy laserového paprsku.

U drážek v konstrukční a korozivzdorné oceli, byla vyhodnocena hloubka drážky z metalografického výbrusu (obr. 46, 47), ale následným pozorováním drážek pomocí elektronového mikroskopu byla zjištěna poměrně členitá struktura drážky. Proto by bylo vhodné pro přesnější a více vypovídající vyhodnocení hloubky a šířky drážek použít laserový konfokální mikroskop pro všechny drážky (stejně jako u drážky v korozivzdorné oceli na obr. 49 s 8 průjezdy laserového paprsku).

3.3 Řady jednotlivých pulsů

Podstatou tohoto experimentu bylo nastavení nejkratší délky pulsu, kterou bylo možné na daném laseru nastavit. Další pracovní parametry byly nastaveny, tak aby nedocházelo k překrytí jednotlivých pulsů a mohly být pozorovány a vyhodnocovány jednotlivé pulsy (krátery).

- **Použité materiály**

Pro experiment byla použita konstrukční a korozivzdorná ocel, stejná jako v předešlém experimentu. Základní vlastnosti materiálů použitých v tomto experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.1.

- **Provedení experimentu**

Po nastavení pracovních parametrů byl u jednotlivých průjezdů laserového paprsku měněn pouze špičkový výkon, byly vytvořeny řady pulsů v konstrukční a korozivzdorné oceli, které bylo možné následně porovnat. Konkrétní pracovní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tab. 6.3 Zadané a vypočtené hodnoty pracovních parametrů.

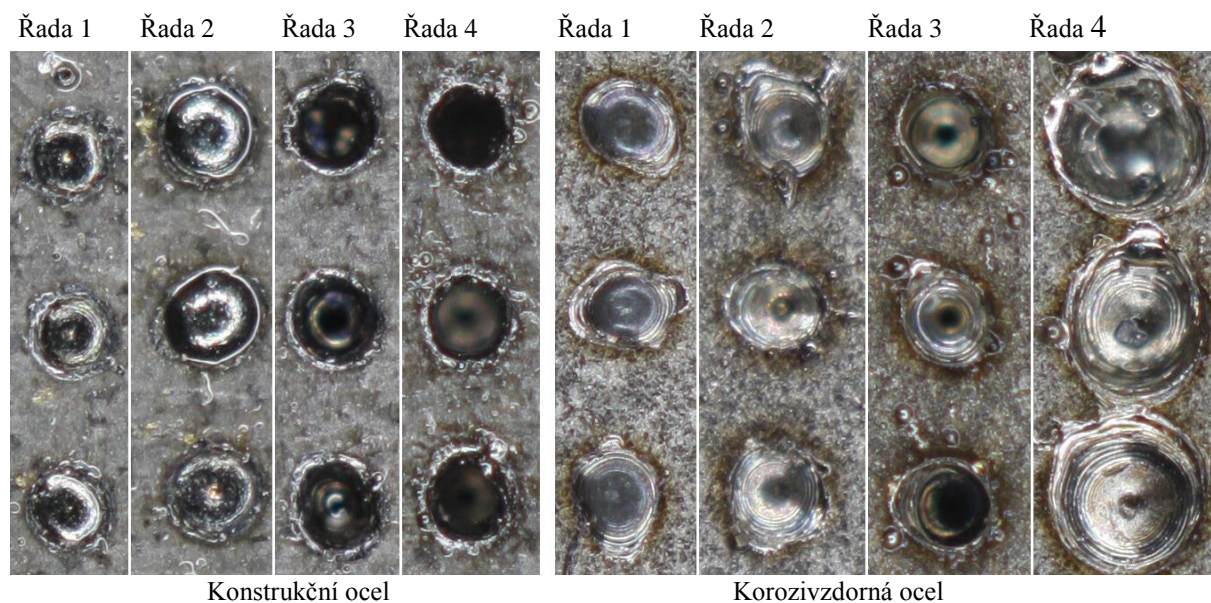
Pracovní parametry	Jednotky	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4
Špičkový výkon	[W]	400	800	1200	1600
Průměrný výkon	[W]	20	40	60	80
Hustota špičkového výkonu	[MW.cm ⁻²]	5,10	10,19	15,29	20,38
Frekvence	[Hz]	50			
Délka pulsu	[s]	0,001			
Energie v pulsu	[J]	0,4	0,8	1,2	1,6
Duty	[%]	5			
Rychlost posuvu	[mm.s ⁻¹]	30			
Osová vzdálenost pulsů	[mm]	0,6			
Tlak stlačeného plynu	[bar]	2			
Druh stlačeného plynu	[-]	Vzduch			
(zadaná hodnota)					
(vypočtená hodnota)					

- **Vyhodnocení experimentu**

Vyhodnocení byly provedeny nejprve nafocením a porovnáním velikostí jednotlivých pulsů, dále byla hodnocena hloubka a průměr kráteru, který vznikl po zasažení materiálu laserovým paprskem.

Snímky z fotoaparátu

Ze snímků na obrázku 50 je možné porovnat jednotlivé pulsy u stejného materiálu podle hodnoty špičkového výkonu. Je patrné, že pulsy vytvořené při stejném špičkovém výkonu (u jednoho druhu materiálu) se částečně liší a nejsou všechny stejné. Dále lze také porovnat pulsy o stejném špičkovém výkonu mezi konstrukční a korozivzdornou ocelí, kde jsou vidět výrazné rozdíly. Měřítka na obrázku není, ale osová vzdálenost jednotlivých pulsů je 0,6 mm.

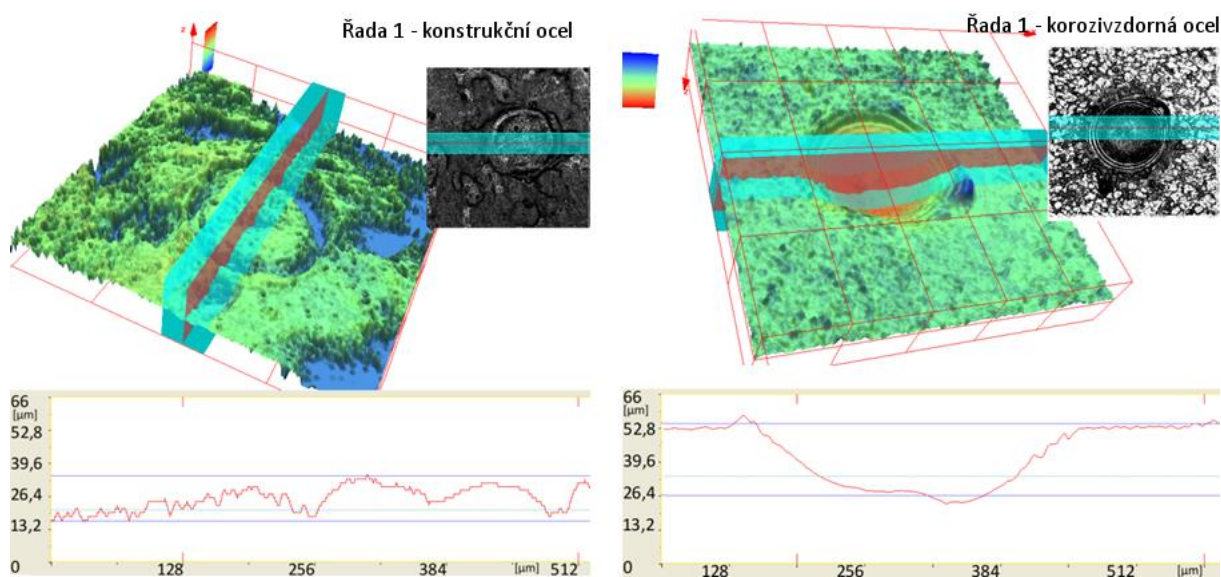


Obr. 50 Řady jednotlivých pulsů při různých špičkových výkonech.

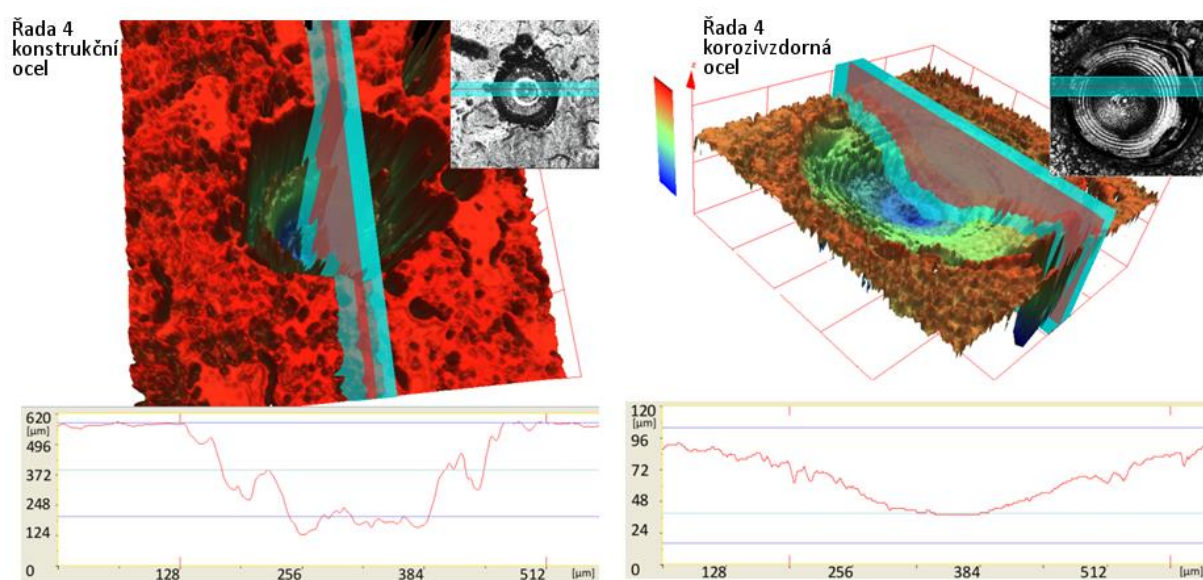
Zobrazení 3D kráterů pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Pro přesné určení průměru kráteru a hlavně jeho hloubky, byly krátery vzniklé při různých výkonech naskenovány pomocí laserového konfokálního mikroskopu. Ze 3D snímků kráterů (obr. 51 a 52 a příloha 5) je patrné, že u konstrukční oceli do hodnoty 800 W špičkového výkonu prakticky nedochází k odstranění materiálu, ale u korozivzdorné oceli došlo k poměrně velkému kráteru i při nejnižším použitém špičkovém výkonu. Při špičkovém výkonu 1600 W se krátery u jednotlivých ocelí výrazně liší.

Změřené rozměry kráteru pulsů jsou uvedeny v tabulce 6.4. Předpokládané průměry kráterů (při porovnání mezi sebou), které jsou na obrázku 50, nekorespondují se změřenými rozměry z laserového konfokálního mikroskopu. Jedním z důvodů je, že bylo provedeno pouze jedno měření každého pulsu při daném špičkovém výkonu. Částečná chyba je i vlivem zprůměrování profilu kráteru ze vzdálenosti 80 μm (na obr. 51 a 52 je tato šířka zeleně zvýrazněna). Na obrázku 50, kde je vidět více pulsů při stejném špičkovém výkonu je patrné, že se tvar kráteru a i jeho rozměry v různých směrech poměrně liší. Proto ani změřené průměry kráterů ve všech případech s narůstajícím špičkovým výkonem nenarůstají.



Obr. 51 Snímek z laserového konfokálního mikroskopu, špičkový výkon 400 W.



Obr. 52 Snímek z laserového konfokálního mikroskopu, špičkový výkon 1600 W.

Tab. 6.4 Změřené rozměry kráterů.

Rozměry	Jednotky	Řada 1	Řada 2	Řada 3	Řada 4
Konstrukční ocel					
Průměr kráteru	[μm]	284	312	291	336
Hloubka kráteru	[μm]	17	23	35	459
Korozivzdorná ocel					
Průměr kráteru	[μm]	306	405	351	619
Hloubka kráteru	[μm]	30	48	153	66

3.4 Drážky v křemíku a ve skle s karbo-nitridovou vrstvou

Další experiment spočíval v gravírování drážky pouze jedním průjezdem laserového paprsku, ale v jiných materiálech než je ocel. Cílem bylo zjistit chování těchto materiálů při interakci s laserovým paprskem a změřit šířky a případné hloubky drážek.

• Použité materiály

První materiál je čistý křemík (99,9% Si), který slouží jako základní materiál pro výrobu polovodičových součástek. Druhý materiál je sklo (sodnovápenaté) s karbo-nitridovou amorfni vrstvou o tloušťce vrstvy 200 nm, tato vrstva vlivem velmi malé tloušťky ovlivňuje především absorpci laserového paprsku, ale na samotný úběr materiálu vliv téměř nemá. Základní vlastnosti materiálů použitých v experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.5.

Tab. 6.5 Základní vlastnosti materiálů [64, 65, 66].

Křemík	Jednotky	Hodnota	Sklo	Jednotky	Hodnota
Tloušťka	[mm]	0,5	Tloušťka	[mm]	0,5
Teplota tání	[°C]	1420	Teplota tání	[°C]	750
Součinitel tepelné vodivosti (20°C)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	150	Součinitel tepelné vodivosti (20°C)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	1
Měrná tepelná kapacita	[KJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,7	Měrná tepelná kapacita	[KJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1

• Provedení experimentu

Pracovní parametry byly zvoleny podobné jako v experimentu s drážkami v konstrukční a korozivzdorné oceli, ale u každé drážky byly částečně změněny tak, aby mohly být následně pozorovány rozdíly u jednotlivých drážek.

3.4.1 Drážky v křemíku

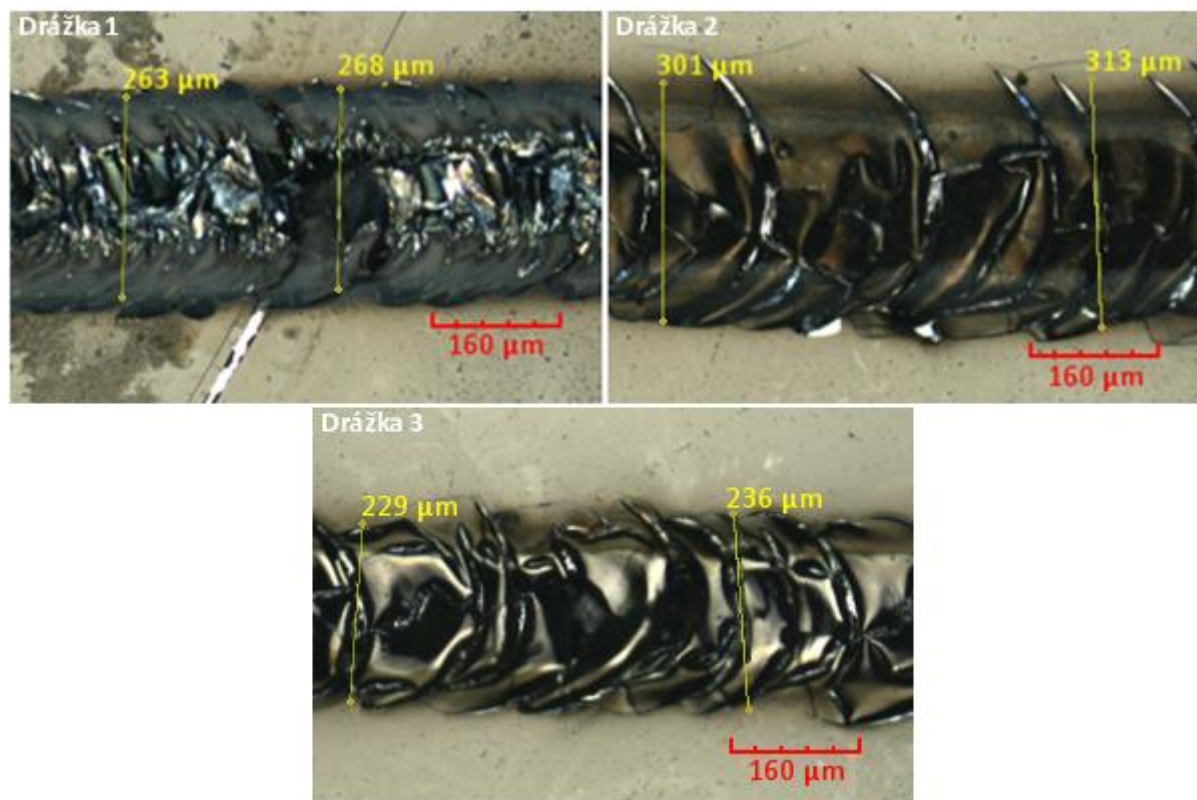
Konkrétní použité pracovní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.6. Změněny byly pouze 3 parametry - frekvence, duty a rychlost posuvu. Ostatní parametry byly pro všechny drážky stejné.

Tab. 6.6 Zadané a vypočtené hodnoty pracovních parametrů.

Pracovní parametry	Jednotky	Drážka 1	Drážka 2	Drážka 3
Špičkový výkon	[W]	200		
Průměrný výkon	[W]	50	140	60
Hustota špičkového výkonu	[MW.cm ⁻²]	2,55		
Frekvence	[Hz]	250	300	300
Délka pulsu	[s]	0,001	0,0023	0,001
Energie v pulsu	[J]	0,2	0,47	0,2
Duty	[%]	25	70	30
Rychlost posuvu	[mm.s ⁻¹]	5	20	20
Překrytí pulsu (délkové)	[%]	80	33,33	33,33
Tlak stlačeného plynu	[bar]	1		
Druh stlačeného plynu	[-]	Dusík		
(zadaná hodnota)				
(vypočtená hodnota)				

Snímky z laserového konfokálního (světelného) mikroskopu

Snímky na obrázku 53, pořízené pomocí světelného mikroskopu jsou 240x zvětšeny, vzorky nebyly žádným způsobem upravovány. Bylo provedeno změření šířky stopy (drážky), na obrázku 53 jsou tyto rozměry uvedeny.



Obr. 53 Drážky v křemíku při různých pracovních parametrech.

Na obrázku 53 jsou jednotlivé drážky provedeny s jinými pracovními parametry. Drážka 1 má vlivem nízkého posuvu vysoké překrytí, a to 80% oproti dalším drážkám, které mají pouze 33,3 %, proto se od dalších drážek vizuálně poměrně liší. Je nutné podotknout, že průměr ohniska laserového paprsku je 100 µm, ale stopa laserového paprsku je 2x až 3x větší.

Změřené šířky drážek odpovídají nastaveným pracovním parametrům, např. u drážky 1 byla nastavena menší frekvence i duty než u drážky 3, ale vlivem výrazně nižší posuvové rychlosti docházelo k vnesení vyššího množství tepla do materiálu, proto i změřená šířka drážky 1 je širší než drážka 3. Další porovnání může být provedeno u drážky 2 a 3, kde byly pracovní parametry změněny pouze u duty. U drážky 2 bylo duty 70 %, ale u drážky 3 pouze 30 %, což souvisí také s vneseným teplem do materiálu a odpovídají tomu také šířky drážek (drážka 2 > drážka 3).

Hloubku drážky nelze v tomto případě určit, ale z jednotlivých snímků drážek pořízených světelným mikroskopem, je lze částečně porovnat. Jelikož všechny snímky jsou pořízeny při stejném zvětšení a tudíž i optikou, tak u drážky 1 je patrné zaostření pouze na dno (střed) drážky, okraje zaostřené nejsou. U drážky 2 je také patrná nezaostřená oblast, ale v menší míře než u drážky 1, kdežto drážka 3 se jeví jako zaostřená v celé šířce drážky. Proto lze porovnat hloubky drážek a to: drážka 1 > drážka 2 > drážka 3, tato úvaha koresponduje i s pracovními parametry jednotlivých drážek.

Přesná šířka drážky, kde došlo k odebrání materiálu, nelze v tomto případě přesně určit, jelikož změřené šířky spíše odpovídají tepelně ovlivněné oblasti a reakci na rychlý ohřev a následné zchladnutí materiálu v okolí drážky než šířce okrajů drážky, kde došlo pouze k odebrání materiálu.

3.4.2 Drážky ve skle s karbo-nitridovou vrstvou

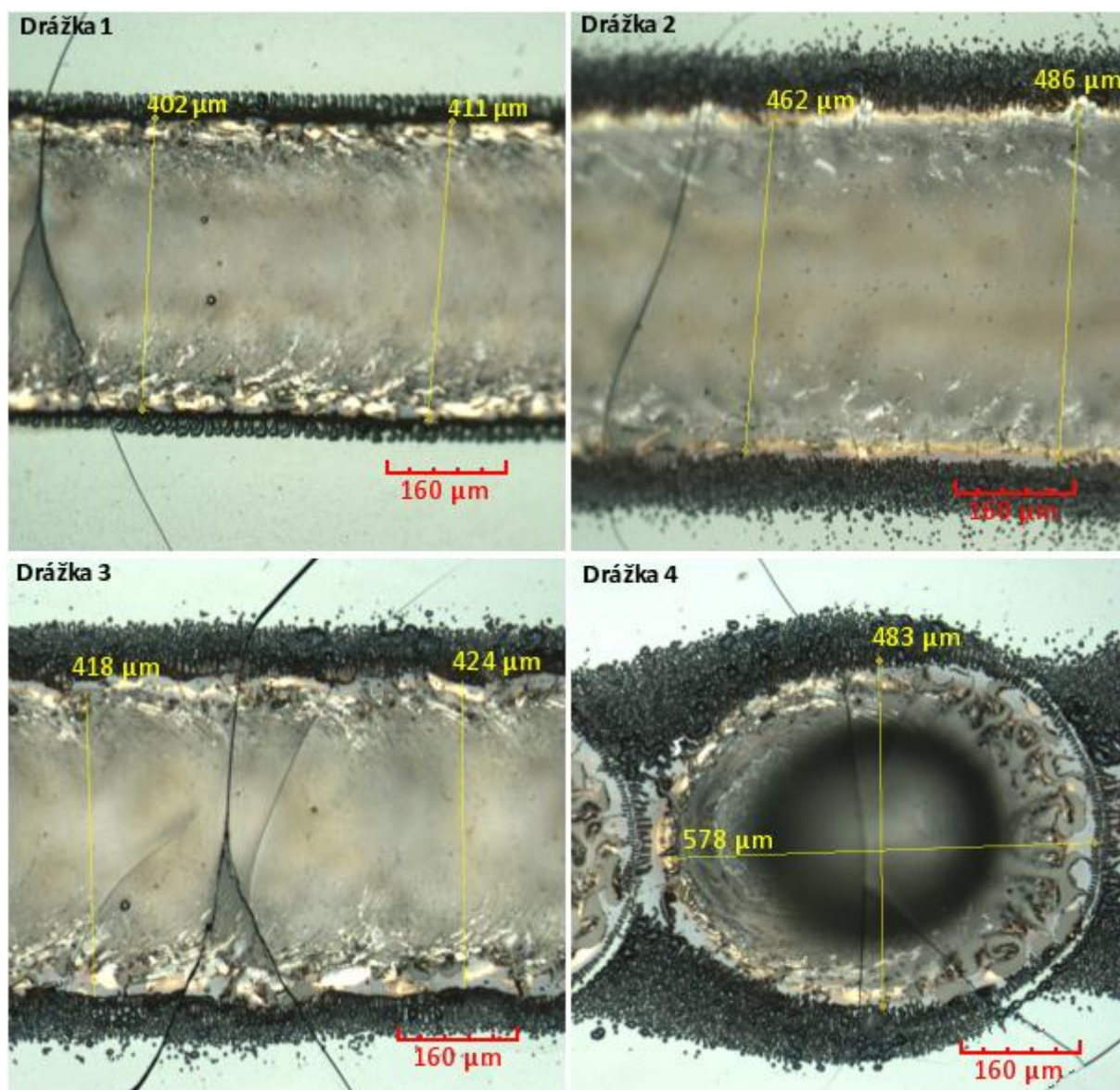
Konkrétní použité pracovní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.6. Změněny byly pouze 2 parametry - frekvence a duty, ostatní parametry byly pro všechny drážky stejné.

Tab. 6.6 Zadané a vypočtené hodnoty pracovních parametrů.

Pracovní parametry	Jednotky	Drážka 1	Drážka 2	Drážka 3	Drážka 4
Špičkový výkon	[W]	200			
Průměrný výkon	[W]	60	100	60	60
Hustota špičkového výkonu	[MW.cm ⁻²]	2,55			
Frekvence	[Hz]	300	300	100	30
Délka pulsu	[s]	0,001	0,0017	0,003	0,01
Energie v pulsu	[J]	0,2	0,33	0,6	2
Duty	[%]	30	50	30	30
Rychlost posuvu	[mm.s ⁻¹]	20			
Překrytí pulsu (délkové)	[%]	33,33	33,33	0	0
Tlak stlačeného plynu	[bar]	1			
Druh stlačeného plynu	[-]	Dusík			
(zadaná hodnota)					
(vypočtená hodnota)					

Snímky z laserového konfokálního (světelného) mikroskopu

Pořízené snímky na obrázku 54 pomocí světelného mikroskopu jsou 240x zvětšeny, vzorky nebyly žádným způsobem upravovány. Vlivem rozpraskání materiálu vznikl nerovný povrch, který bylo obtížné zaostřit ve větší ploše, proto jsou některé snímky z části rozmazané. Změřeny byly stopy od laserového paprsku, na obrázku 54 jsou uvedené změřené šířky.



Obr. 54 Drážky ve skle s karbo-nitridovou vrstvou při různých pracovních parametrech.

Na obrázku 54 jsou patrné u všech drážek trhliny, které byly způsobeny vneseným teplem do materiálu, je patrné, že zvolené pracovní parametry byly pro daný materiál nevyhovující. Stejně jako u drážek v křemíku je průměr ohniska laserového paprsku 100 μm, kdežto stopa laserového paprsku je zde až 5x větší.

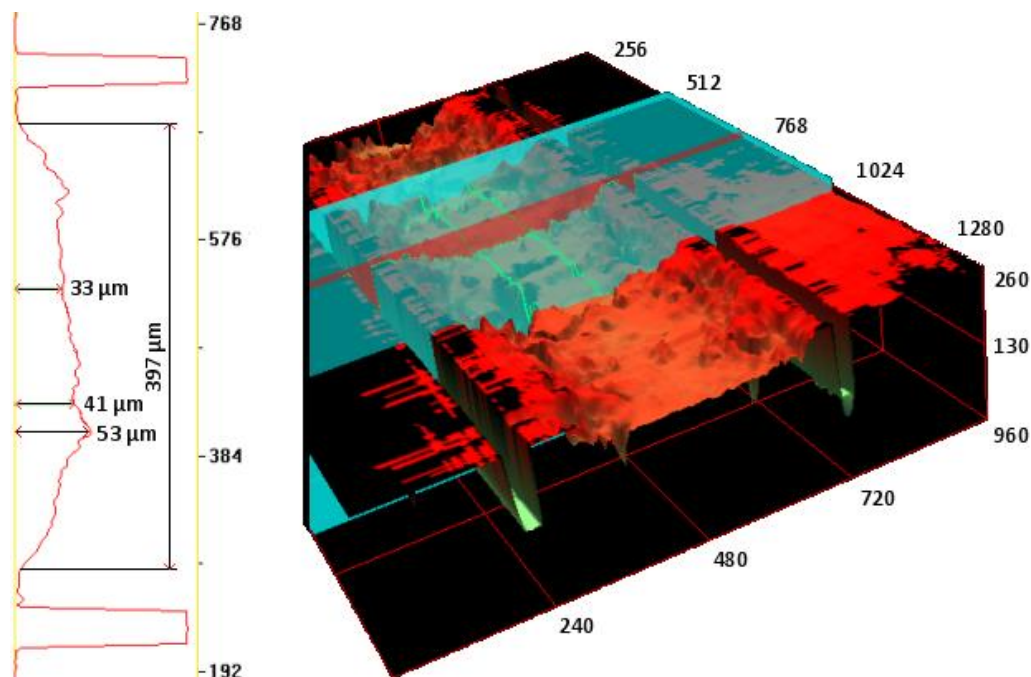
Lze porovnat drážku 3 u křemíku a drážku 1 u skla s karbo-nitridovou vrstvou, kde byly použity totožné pracovní parametry. Prvně zmiňovaná drážka je přibližně o 70 μm užší než drážka ve skle s karbonitridovou vrstvou. Překrytí pulsů je u drážek 1 a 2 33,3 %, ale

u drážky 3, která se jeví, že u ní také docházelo k překrytí pulsů, překrytí není. U drážky 3 je mezera mezi jednotlivými pulsy 100 μm a u drážky 4 dokonce 570 μm . U drážky 1 a 2 došlo k rozdílné šířce, vlivem rozdílné hodnoty duty. Zvláště u drážky 4 jsou patrné jednotlivé pulsy, které způsobily poměrně velkou stopu od laserového paprsku (pravděpodobně s vyloučeným uhlíkem – tečky po okraji stopy). Elipsovitý tvar stopy paprsku u drážky 4 je způsobený posuvem laserového paprsku i přes to, že laserový puls trval pouze 0,01 s.

Zobrazení 3D gravírované drážky pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Provedeno bylo další vyhodnocení u drážky 3, která byla pomocí laserového konfokálního mikroskopu naskenována, a poté mohly být přesně změřeny hloubky a šířky drážky. Na obrázku 55 je zobrazený 3D povrch drážky a na levé straně je zprůměrovaný tvar drážky (z modré oblasti – z 500 μm). Hluboké a úzké drážky na okrajích hlavní drážky jsou způsobeny chybným vyhodnocením laserového konfokálního mikroskopu, v těchto místech je pravděpodobně vyloučený uhlík (černé pruhy s tečkami na obrázku 54 u drážky 3), který byl laserovým konfokálním mikroskopem špatně vyhodnocen.

Šířka drážky, která je na obrázku 55 změřena a uvedena – 397 μm neodpovídá stopě po laserovém paprsku, která by se měla pohybovat okolo 100 μm (100 μm je průměr ohniska). Přibližně 4krát větší šířka drážky je pravděpodobně způsobena materiálem, ve kterém dojde vlivem prudkého ohřevu k pnutí a díky křehkosti materiálu k jeho odstranění i v okolí místa kde došlo k interakci laserového paprsku s materiálem.



Obr. 55 Snímek z laserového konfokálního mikroskopu, drážka 3 ve skle s karbo-nitridovou vrstvou.

3.5 Gravírovaný povrch

Odstraňování vrstvy materiálu v určité ploše je také jednou možnou variantou, kde lze využít laserové mikroobrábění a gravírování. Cílem bylo zhodnocení výsledné struktury gravírovaného povrchu a změření drsnosti tohoto povrchu.

- **Použité materiály**

Pro experiment byla použita konstrukční a korozivzdorná ocel (stejná jako u gravírování drážek v ocelích). Základní vlastnosti materiálů použitých v experimentu jsou uvedeny v tabulce 6.1.

- **Provedení experimentu**

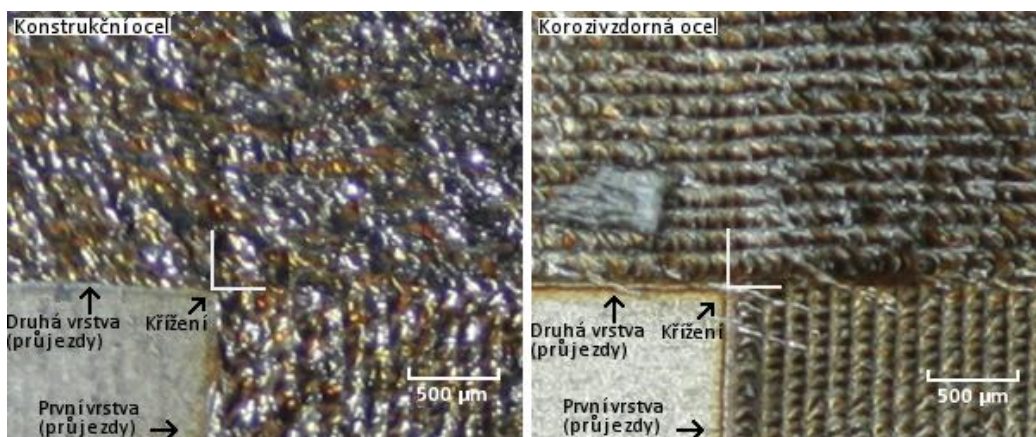
Tento experiment spočíval v průjezdech laserového paprsku v jednotlivých řadách vedle sebe. Jednotlivé průjezdy laserového paprsku byly od sebe vzdáleny 100 μm , tímto způsobem byl vytvořen gravírovaný pruh široký 5 mm. Další částí experimentu bylo vytvoření stejného pruhu, který se z části křížil s předešlým pruhem. Byly použity stejné pracovní parametry jako v experimentu 3.2 (tabulka 6.2).

- **Vyhodnocení experimentu**

Pořízení snímků v tomto experimentu bylo provedeno pomocí fotoaparátu a stereo mikroskopem. Laserovým konfokálním mikroskopem byly naskenovány gravírované povrchy a získán 3D reliéf gravírovaného povrchu. Také byla změřena drsnost gravírovaných povrchů (v místě bez křížení).

Snímky z fotoaparátu

Na obrázku 56 jsou patrné rozdíly v reakci jednotlivých materiálů na laserový paprsek u konstrukční a korozivzdorné oceli. Směry jednotlivých průjezdů laserového paprsku, které jsou patrné u korozivzdorné oceli (obrázek 56), jsou totožné se směry průjezdů u konstrukční oceli. Konstrukční ocel vykazuje velmi neuspořádanou strukturu i v oblasti bez křížení. Naopak u korozivzdorné oceli jsou patrné jasné stopy od laserového paprsku, jak řady průjezdů, tak i jednotlivé pulsy. Hlavním důvodem je rozdílná tepelná vodivost, korozivzdorná ocel má přibližně 4x menší tepelnou vodivost, a proto nedochází k natavení v takové míře jako u konstrukční oceli. Hlavně u korozivzdorné oceli je patrný rozstřík taveniny, který ulpíval na hrubém gravírovaném povrchu.

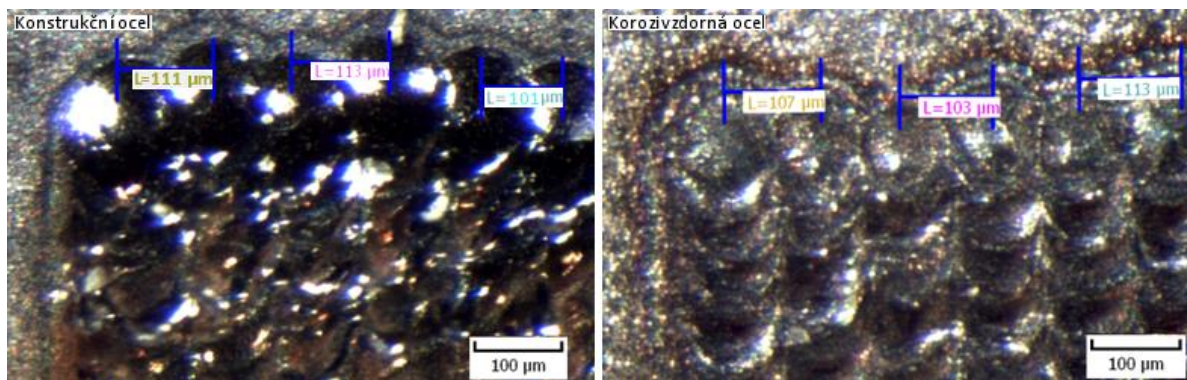


Obr. 56 Gravírované plochy v ocelích.

U obou materiálů na obrázku 56, ale hlavně v příloze 6 jsou patrné rozdíly ve vzhledu gravírované vrstvy bez křížení v horizontálním a vertikálním směru. Možným důvodem je anizotropie materiálu v různých směrech.

Snímky ze stereo mikroskopu

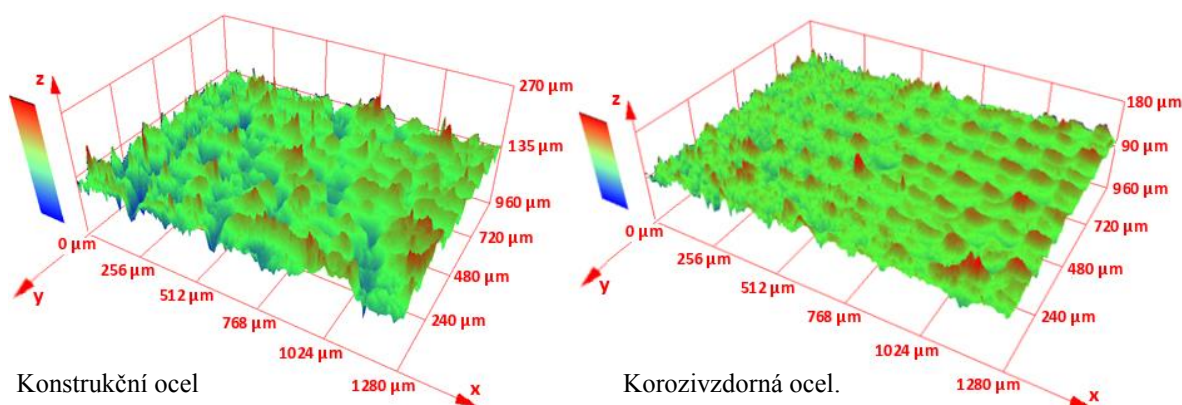
Na dalším obrázku 57 s detailem konce gravírované plochy je opět vidět neuspořádanost struktury u konstrukční oceli, oproti korozivzdorné oceli jsou zde také změřeny vzdálenosti jednotlivých řad vedle sebe.



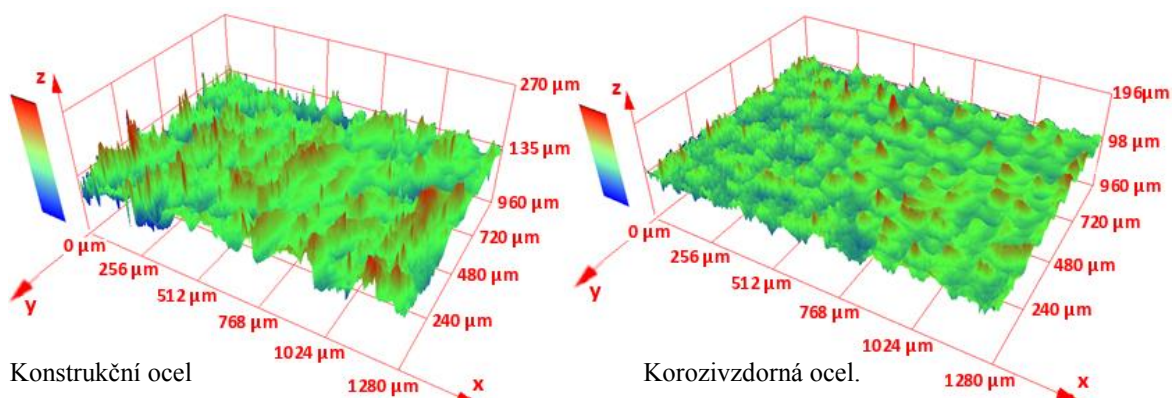
Obr. 57 Detail konce gravírované plochy v ocelích.

Zobrazení 3D gravírovaného povrchu pomocí laserového konfokálního mikroskopu

Prostorová struktura povrchu je vidět na obrázku 58, kde je pomocí laserového konfokálního mikroskopu naskenovaný povrch u obou materiálů v místě bez křížení. Ve směru osy y byly provedeny jednotlivé průřezy laserového paprsku a ve směru osy x byly jednotlivé průřezy uspořádány vedle sebe ve vzdálenosti 100 μm . Na dalším obrázku 59 je naskenovaný povrch v místě křížení.



Obr. 58 Prostorová struktura gravírovaného povrchu bez křížení.



Obr. 59 Prostorová struktura gravírovaného povrchu s křížením.

Na obrázcích 58 a 59 jsou použita různá měřítka na ose z, což částečně zkresluje vizuální dojem při porovnávání jednotlivých povrchů. U konstrukční oceli jsou měřítka stejná, u korozivzdorné oceli se mírně liší. U obou snímků korozivzdorné oceli se skenovaný povrch v průběhu osy x z neznámého důvodu mění.

Drsnost povrchu

Další částí vyhodnocení tohoto experimentu bylo změření drsnosti gravírovaného povrchu, kolmo na směr průjezdů laserového paprsku v místě bez křížení u konstrukční i korozivzdorné oceli. U konstrukční oceli dle předpokladu byla hodnota R_a i R_z vyšší než u korozivzdorné oceli. Byla změřena drsnost povrchu materiálu i v místě bez gravírování. V tabulce 6.7 jsou uvedeny hodnoty drsnosti a v příloze 7 je protokol z měření drsnosti povrchu.

Tab. 6.7 Hodnoty drsnosti povrchu.

Materiál	Povrch materiálu (negravírovaný)		Gravírovaný povrch	
	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
Konstrukční ocel	0,39	2,238	7,172	33,32
Korozivzdorná ocel	0,451	2,882	4,129	18,11

3.6 Vrtání

Vrtání je další způsob mikroobrábění, kdy se sadou pulsů vytvoří otvor. Podstatou experimentu bylo zjištění průměru otvoru v závislosti na špičkovém výkonu, případně dalších pracovních parametrech.

• Provedení experimentu

Pro vytvoření otvorů byl použit nejjednodušší způsob výroby otvorů laserovým paprskem, a to pulsním vrtáním (kapitola 2.9.1 *Laserové mikro vrtání*). Doba vrtání byla 3 s, postupovalo se od nejvyššího špičkového výkonu až po výkon, kdy nedošlo k vytvoření otvoru. Poté byla dále upravena frekvence, pracovní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.8.

Tab. 6.8 Zadané a vypočtené hodnoty pracovních parametrů.

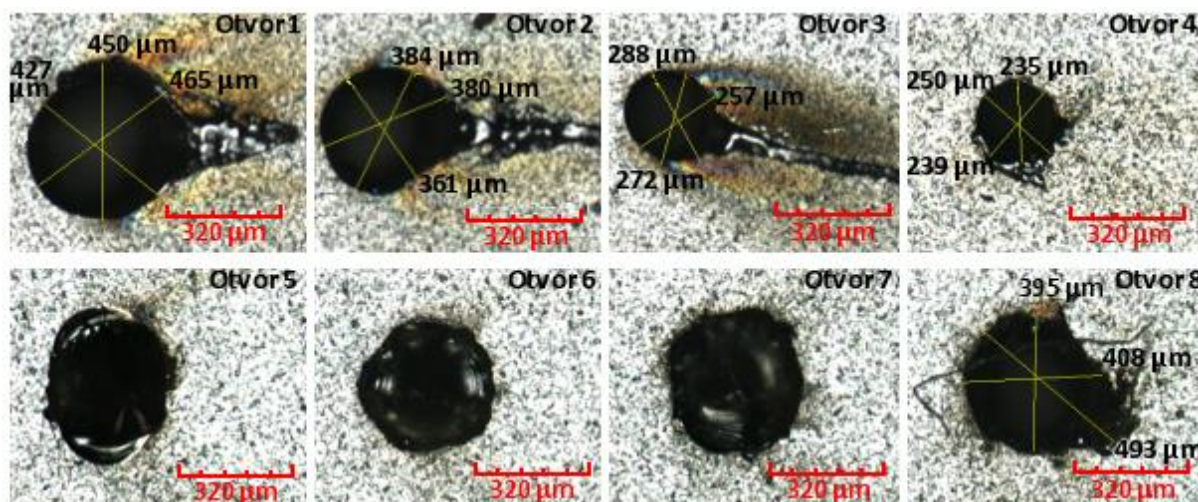
Pracovní parametry	Jednotky	Otvor 1	Otvor 2	Otvor 3	Otvor 4	Otvor 5	Otvor 6	Otvor 7	Otvor 8
Špičkový výkon	[W]	1000	800	600	500	400	450	450	450
Průměrný výkon	[W]	10	8	6	5	4	4,5	6,75	9
Hustota špičkového výkonu	[MW.cm ⁻²]	12,74	10,19	7,64	6,37	5,1	5,73	5,73	5,73
Frekvence	[Hz]	10	10	10	10	10	10	15	20
Délka pulsu	[s]	0,001							
Energie v pulsu	[J]	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,45	0,45	0,45
Duty	[%]	1	1	1	1	1	1	1,5	2
Tlak stlačeného plynu	[bar]	1							
Druh stlačeného plynu	[-]	Dusík							
Průměrný průměr otvoru	[μm]	447	411	365	242	-	-	-	432
(zadaná hodnota)									
(vypočtená hodnota)									

- **Použité materiály**

V tomto experimentu byl použit křemík, stejný jako při gravírování drážek. Základní vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 6.5.

- **Vyhodnocení experimentu**

Pořízené snímky na obrázku 60 pomocí laserového konfokálního mikroskopu jsou 120x zvětšeny. Vzorky s otvory 1 až 3 nebyly žádným způsobem upravovány, ostatní vzorky s otvory 4 až 8 byly očištěny, aby došlo ke zvýraznění samotných otvorů. Změření otvoru bylo provedeno ve více místech, rozměry jsou uvedeny přímo v obrázku.



Obr. 60 Otvory v křemíku při různých pracovních parametrech.

Na obrázku 60 jsou otvory vytvořené při různých pracovních parametrech. U otvorů 1 až 4 je patrné zmenšování průměru otvoru, se zmenšováním špičkového výkonu. U otvoru 5 už nedošlo k vytvoření otvoru skrz materiál, poté byl navýšen špičkový výkon na 450 W, ten zůstal pro otvory 6 – 8 stejný a u těchto otvorů byla dále zvyšována frekvence. K opětovnému vytvoření otvoru skrz materiál došlo až u otvoru 8.

Vytvoření otvoru při jednotlivých špičkových výkonech trvalo rozdílnou dobu, s tím souvisí i celkové vnesené teplo do materiálu a velikost ovlivnění okolo otvoru. To je patrné u otvoru 3 a 5, rozdíl ve špičkovém výkonu u těchto otvorů činí 200 W, ale otvor 5 (se 400 W) se jeví jako větší než otvor 3 (s 600 W). Důvodem je rozdílná doba působení laserového paprsku na materiál. U otvoru 3 došlo k vytvoření otvoru skrz materiál a doba působení laserového paprsku zde byla méně jak 3 s, tudíž méně vneseného tepla, ale otvor 5 byl vystaven laserovému paprsku po celou dobu 3s.

Otvory 4 a 8 se liší ve špičkovém výkonu pouze o 50 W, ale změřená velikost otvoru se liší o 190 μm, kde otvor 8 je o tuto hodnotu větší než otvor 4. Příčinou je dvojnásobně větší frekvence u otvoru 8 a tudíž více vneseného tepla.

4 DISKUZE

Laserové mikroobrábění a gravírování je poměrně široká oblast. Jednotlivé aplikace jako je vrtání, řezání, 3D obrábění nebo strukturování povrchu mají společný základ, ale další problematika se liší. Jelikož práce byla obecně zaměřena na laserové mikroobrábění, v teoretické části práce byly stručně popsány jednotlivé mikroobráběcí aplikace a v experimentální části některé tyto aplikace vyzkoušeny.

V experimentální části bylo navrženo několik pokusů s výkonovým vláknovým Yb:YAG laserem, který je primárně určený pro jiné aplikace než je mikroobrábění a gravírování. Proto by bylo vhodné porovnání provedených experimentů s laserem, který je primárně určen pro oblast mikroobrábění. Hlavní rozdíl by pravděpodobně vznikl ve způsobu odstranění materiálu, jelikož lasery určené pro oblast mikroobrábění a gravírování odstraňují materiál převážně sublimací.

Pro korektní vyhodnocení experimentu je důležité použít více rozdílných metod vyhodnocování, kterými se zjistí různé výsledky a společně může dojít k přesnějšímu a spolehlivějšímu vyhodnocení. Většinou se použilo více způsobů vyhodnocení, ale u některých experimentů by bylo vhodné provést ještě další. Hodnoceny byly převážně rozměry otvorů, drážek a povrch na gravírovaných plochách, ale nehodnotila se míra tepelného ovlivnění, což je u některých aplikací laserového mikroobrábění také důležité.

Při vyhodnocování gravírované plochy pomocí laserového konfokálního mikroskopu, kdy byly získány snímky 3D povrchu, byla nastavena rozdílná měřítka v ose z , což je při následném porovnávání povrchů nevhodné. U podobných experimentů, kdy jde hlavně o porovnávání jednotlivých výsledků, je nutné získávat výsledky při stejných podmínkách, pokud je to možné.

Výsledky experimentů

U drážek v konstrukční a korozivzdorné oceli došlo k vytvoření různé hloubky podle počtu průjezdů (průměrně jedním průjezdem došlo k odstranění vrstvy 11 μm u konstrukční a 13 μm u korozivzdorné oceli). Experiment, při kterém byly vytvořeny řady jednotlivých pulsů bez překrytí v konstrukční a korozivzdorné oceli, byly zjištěny odlišné rozměry kráterů při stejných pracovních parametrech. U drážek v křemíku a ve skle s karbo-nitridovou vrstvou vznikly až 5x širší stopy (486 μm), než je průměr ohniska laserového paprsku. U experimentu s gravírovanou plochou, došlo ke vzniku rozdílného povrchu po stránce vizuální i z hlediska drsnosti. Gravírovaný povrch u konstrukční oceli měl hodnotu R_a 7,2 μm a druhá ocel měla R_a 4,1 μm při stejných pracovních parametrech. Při vrtání křemíku došlo k vytvoření otvoru různého průměru v závislosti na špičkovém výkonu a opakovací frekvenci. Nejmenší otvor (průměr 242 μm) byl vytvořen při špičkovém výkonu 500 W a frekvenci 10 Hz, při menším špičkovém výkonu (450 W), ale vyšší frekvenci, byl otvor téměř dvojnásobného průměru.

ZÁVĚR

Hlavním rysem laserového mikroobrábění a gravírování je pulsní režim s různou délkou pulsu (obvykle v řádech ns). S krátkými pulsy souvisí vysoký špičkový výkon, ale relativně nízký průměrný výkon. Vlnová délka záření je jedním z hlavních parametrů laserů a ovlivňuje absorpci záření materiálem. Při vysokých špičkových výkonech dochází k anomální absorpci záření, která je výrazně vyšší než při běžných výkonech. K odstranění materiálu u mikroobrábění a gravírování dochází převážně sublimací. Často je laserové mikroobrábění spojováno s obráběním bez tepelného ovlivnění a pro dosažení tohoto výsledku je nejdůležitější délka pulsu, která nesmí překročit 10 ps.

Bylo provedeno několik experimentů (drážky, jednotlivé pulsy - krátery, gravírovaná vrstva a vrtání), kde se hlavně hodnotilo množství a rozsah odstraněného materiálu. Využíván byl výkonový vláknový laser Yb:YAG s řezací hlavou (s přívodem stlačeného plynu). Pro experiment bylo použito více materiálů - konstrukční ocel, korozivzdorná ocel, sklo s karbo-nitridovou vrstvou a křemík, který se v dnešní době využívá v čím dál větší míře (v elektronice) a často se při jeho zpracování používá právě laserové mikroobrábění.

U prvního experimentu, kdy byly vytvářeny drážky s 8 a 16 průjezdy jsou na dně zbytky přetaveného, neodstraněného materiálu, a proto lze tímto způsobem prohlubovat drážky jen do určité míry. V druhém experimentu se výrazně projevila odlišnost materiálů u vzniklých kráterů. Jednou z hlavních příčin je rozdílná tepelná vodivost materiálu, ale i rozdílná absorpce záření. U drážek v křemíku a sklu s karbo-nitridovou vrstvou došlo k vytvoření stopy paprsku až 5x širší než byl průměr ohniska, zde by bylo vhodné použít kratší pulsy tak, aby došlo k vnesení méně tepla do materiálu a vytvoření stopy paprsku stejné jako je průměr ohniska. Použité pracovní parametry u skla s karbo-nitridovou vrstvou byly pro daný materiál nevhodné, došlo k popraskání vzorku vlivem vnesení nadměrného množství tepla do materiálu. Gravírovaný povrch u dalšího experimentu vykazuje rozdílnou strukturu u konstrukční a korozivzdorné oceli (opět se potvrdily rozdílné výsledky u 2 odlišných materiálů). Průměry otvorů vrtaných do křemíku dle předpokladu závisí na špičkovém výkonu, ale také měla velký význam frekvence, s čímž souvisí množství vneseného tepla do materiálu.

Ze všech experimentů je patrné, že průměr stopy laserového paprsku narůstá se zvyšováním špičkového výkonu, frekvencí a duty, neboli se zvyšováním hodnoty vneseného tepla do materiálu. Také ale záleží na materiálu, což bylo potvrzeno u všech experimentů, protože laserový paprsek působí na každý materiál odlišně. Pro dosažení stejných výsledků u různých materiálů musejí být nastaveny pracovní parametry pro každý materiál individuálně. Odstranění materiálu z místa zasaženého laserovým paprskem se liší podle toho, zda dochází k překrývání pulsů anebo pouze k vytváření jednotlivých kráterů. Výkonový vláknový Yb:YAG laser je možné použít i pro oblast gravírování a mikroobrábění, ale lepších výsledků (menších tepelně ovlivněných oblastí) by bylo dosaženo s použitím kratších pulsů, které nebylo možné na daném laseru nastavit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. STEEN, William M. *Laser Material Processing*. 2 ed. Springer, 1998, 346 s. ISBN 35-407-6174-8.
2. Cesta k objevu: Objev a objevitelé. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [vid. 2014-01-27]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
3. Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím. *Elektro* [online]. 2005, č. 4 [vid. 2014-01-27]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271
4. Seriál o vývoji a využití laserů. *Leonardo věda a technika* [online]. 2013 [vid. 2014-01-27]. Dostupné z: http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/1237246
5. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao lasery a optika* [online]. 2013 [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
6. Nekonenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
7. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc, 2010. [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
8. Princip laseru: Jak funguje laser. *Lasery kolem nás* [online]. 2004 [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
9. TRUMPF. *Laser processing with CO2 lasers: Technical information*. Ditzingen, 2007. [vid. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.trumpf-laser.com/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/DAM/trumpf-laser.com/Technische_Infos/TI_Laser_processing_CO2-Lasers.PDF&t=1400488673&hash=be9635ed230655006a9770df370329ee
10. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. Vyd. 1. Praha: Prometheus, 2000, xxiv, 1198, [52] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
11. SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. 1. vyd. Praha: Academia, 1990, 195 s. ISBN 80-200-0354-1.
12. BUCHFINK, Gabriela. *Fascination of sheet metal: a material of limitless possibilities*. 1st ed. Würzburg, Germany: Vogel Buchverlag. ISBN 978-383-4330-710.
13. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. In: *HSV* [online]. 2013 [vid. 2014-02-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
14. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, č. 9 [vid. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
15. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
16. BENKO, Bernard. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
17. *Laser-assisted fabrication of materials*. New York: Springer, 2012, p. cm. ISBN 978-364-2283-581.

18. Rozdělení laserů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2000 [vid. 2014-02-18]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
19. Průmyslové lasery: Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, č. 9 [vid. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
20. Vývoj laserů a laserových technologií. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, č. 5 [vid. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyvoj-laseru-a-laserovych-technologii.html>
21. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 7 [vid. 2014-02-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
22. Excimer Lasers. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. 2008, č. 1 [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/excimer_lasers.html
23. EXCIMER LASER BASICS. *Gam laser* [online]. 2005 [vid. 2014-02-27]. Dostupné z: http://www.gamlaser.com/excimer_laser_basics.htm
24. Typy laserů. *Jak funguje laser* [online]. 2004 [vid. 2014-02-27]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm#z>
25. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
26. Beam Source: Basics. *Laserline* [online]. 2008 [vid. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.laserline.de/beam-source.html>
27. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 3 [vid. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
28. Innoslab lasers. *Edgewave* [online]. 2009, č. 1 [vid. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.photonicnet.de/veranstaltungen/angebote-photonicnet/events-2007/workshop-photovoltaics/abstracts/resolveUid/bb394aa49c3928262b21dd9a36c1beb5>
29. Průmyslové lasery: svařovací lasery. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, č. 4 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery.html>
30. MRŇA, Libor. Svařování laserem. In: *HSV* [online]. 2013 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013__mrna.pdf
31. Řezání laserem a vrtání laserem: Oblasti použití. *Trumpf* [online]. 2014 [vid. 2014-03-14]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani.html>
32. MRŇA, Libor. Řezání laserem. In: *HSV* [online]. 2013 [vid. 2014-03-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani_rezani_laserem_2013__mrna.pdf
33. Průmyslové lasery: Laserové řezání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, č. 10 [vid. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>

34. Řezání plamenem: Laserové řezání. *Trumpf* [online]. 2014 [vid. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/rezani-plamenem.html>
35. Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, č. 7 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
36. Laserové kalení: Oblasti použití. *Trumpf* [online]. 2014 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
37. MRŇA, Libor. Navařování laserem. In: *HSV* [online]. 2013 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf
38. Process principle: Cladding. *Laserline* [online]. 2008 [vid. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.laserline.de/process-principles-cladding.html>
39. Pájení: Oblasti použití. *Trumpf* [online]. 2014 [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/pajeni.html>
40. Vrtání: Oblasti použití. *Trumpf* [online]. 2014 [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
41. Nekonenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 5 [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
42. Laserové technologie ústavů FG. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, č. 7 [vid. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-technologie-ustavu-fg.html>
43. PIQUE Alberto, Douglas B. *Direct-write technologies for rapid prototyping applications sensors, electronics, and integrated power sources*. San Diego: Academic Press, 2002. ISBN 978-008-0504-643.
44. Značení a gravírování laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2003, č. 5 [vid. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem.html>
45. Plastic Marking With a Fiber Laser. *SPI Lasers* [online]. 2009 [vid. 2014-03-27]. Dostupné z: http://www.spilasers.com/Applications/redENERGY/Plastics_Marking_With_A_Fiber_Laser.aspx#
46. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 20 s. ISBN 978-80-244-3076-8.
47. KOÇ, Muammer and Tuğrul ÖZEL. *Micro-manufacturing: design and manufacturing of micro-products*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2011, x, 388 p., [4] leaves of color plates. ISBN 9781118010556.
48. OEHLER, Andreas and Kurt WEINGARTEN. *Picosecond laser processing using ultrafast beam deflection*. 8952 Schlieren, Switzerland, 2014.
49. BUCHFINK, Gabriela. Ed. Nicola, LEIBINGER-KAMMÜLLER. Transl. Matthew R. *The laser as a tool a light beam conquers industrial production*. 1. ed. Würzburg: Vogel, 2007. ISBN 978-383-4330-727.
50. BEYER, Eckhard. FRAUNHOFER IWS. *Fiber/disc lasers versus direct diode lasers*. Dresden, 2014.

51. Multi-beam technology boosts cost efficiency. *Industrial laser solutions* [online]. 2013 [vid. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-2/departments/update/multi-beam-technology-boosts-cost-efficiency.html>
52. Marking With A Pulsed Fiber Laser. *SPI Lasers* [online]. 2009 [vid. 2014-04-01]. Dostupné z: http://www.spilasers.com/Applications/redENERGY/Marking_with_A_Pulsed_Fiber_Laser.aspx
53. Measuring Laser Power and Energy Output. *Coherent* [online]. 2007 [vid. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.coherent.com/downloads/AboutMeasuringLaserPowerndEnergyOutputFinal.pdf>
54. Laser Micromachining. *Potomac* [online]. 2006 [vid. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.potomac-laser.com/services/capabilities/laser-micromachining/>
55. Ultrakrátké pulzy na Laser: Ultrakrátké pulzy na Laser. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 7 [vid. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ultrakratke-pulzy-na-laser-world-of-photonics.html>
56. Zpracování materiálů studeným laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, č. 4 [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zpracovani-materialu-studenym-laserem.html>
57. Laser 2007. *Techtydeník* [online]. 2006 [vid. 2014-04-06]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/laser-2007_13170.html
58. Základní informace k popisovacím laserům. *MediCom* [online]. 2008 [vid. 2014-04-08]. Dostupné z: <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove.produkty.popisoem>
59. Laser Cutting. *KJLaser Micromachining* [online]. 2014 [vid. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.kjlasermicromachining.com/capabilities/laser-cutting/>
60. Scanner Based Pulsed Cutting Techniques. *SPI Lasers* [online]. 2009 [vid. 2014-04-12]. Dostupné z: http://www.spilasers.com/Applications/redENERGY/Scanner_Based_Pulsed_Cutting_Techniques.aspx
61. Engraving Of Aluminium Alloys With Pulsed Fiber Lasers. *SPI Lasers* [online]. 2009 [vid. 2014-04-14]. Dostupné z: http://www.spilasers.com/Applications/redENERGY/Engraving_of_aluminium_alloys_with_pulsed_fiber_lasers.aspx
62. High power fiber lasers: for industrial applications. [online]. 2011 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.industriallaser.com.au/pdf/HP_Brochure.pdf
63. IRB 2400 Industrial Robot: ABB. [online]. 2009 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/898b798f7e4ed57bc1257a1d0050dc5f/\\$file/PR10034%20EN%20R7_HR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/898b798f7e4ed57bc1257a1d0050dc5f/$file/PR10034%20EN%20R7_HR.pdf)
64. LEINVEBER, Jan. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7.
65. ČSN 41 1343. *Ocel 11343*. Dobrá: VÚHŽ, 1992.
66. ČSN EN 10088-1. *Korozivzdorné oceli: Část 1: Přehled korozivzdorných ocelí*. 2005.
66. Laserové technologie. *ÚPT AVČR* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.isibrno.cz/index.php?co=/team/teamhome.php&id_celek=933&lang=_cz&id_druh_menu=2&url=http://www.isibrno.cz/kgs
67. Test results ytterbium laser system YLS-2000-S2T
68. Citace pro. *Citace* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Popis	Jednotky
BPP	Beam parameter product,	[mm.mrad]
E	Energie pulsu	[J]
E ₀	Energie na energetické hladině 1	[eV]
E _x	Energie na energetické hladině 2	[eV]
h	Planckova konstanta	[J.s]
M ²	Parametr charakterizující laserový paprsek	[-]
P _{AVG}	Průměrný výkon	[W]
P _{PEAK}	Špičkový výkon	[W]
S	Plocha ohniska	[cm ²]
t	Délka pulsu	[s]
z	Teoretická hloubka kráteru	[μm]
δ	Hloubka penetrace záření	[μm]
Θ	Úhel rozbíhavosti paprsku (divergence)	[mrad]
λ	Vlnová délka	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ω	Průměr zaostřeného paprsku (ohniska)	[mm]
Φ	Hustota špičkové energie	[J.cm ⁻²]
Φ _{th}	Hraniční hustota energie	[J.cm ⁻²]


Zkratka	Popis
CW	Kontinuální režim laseru
DPI	Počet bodů na palec (dots per inch)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Hodnoty parametrů laserového paprsku pro konkrétní laser, laserovou hlavou a optické vlákno [67]. |
| Příloha 2 | Záznam z osciloskopu. |
| Příloha 3 | Postup provedení experimentu. |
| Příloha 4 | Snímky z elektronového mikroskopu při různém zvětšení. |
| Příloha 5 | Zobrazení 3D kráterů pomocí laserového konfokálního mikroskopu. |
| Příloha 6 | Snímky gravírované plochy na konstrukční a korozivzdorné oceli. |
| Příloha 7 | Zvětšené snímky gravírované plochy na konstrukční a korozivzdorné oceli pomocí stereo mikroskopu s vyhodnocením drsností povrchů. |

PŘÍLOHA 1

Hodnoty parametrů laserového paprsku pro konkrétní laser, laserovou hlavou a optické vlákno [67].

	TEST RESULTS YTTERBIUM LASER SYSTEM YLS-2000-S2T S/N 10063050	Form: 38372 Revision: 72 Page: 4 of 15
---	--	--

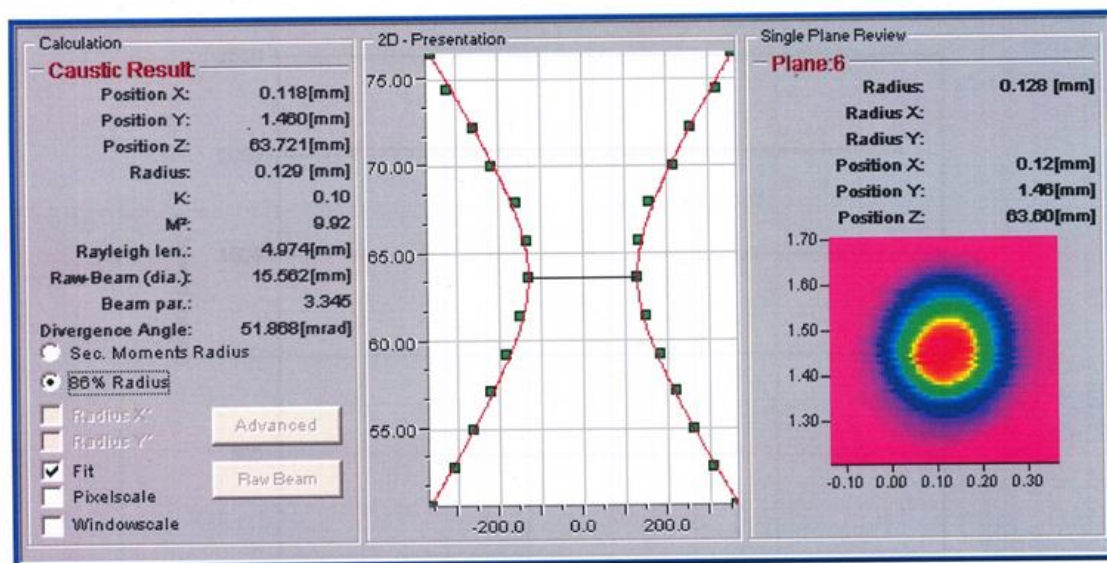
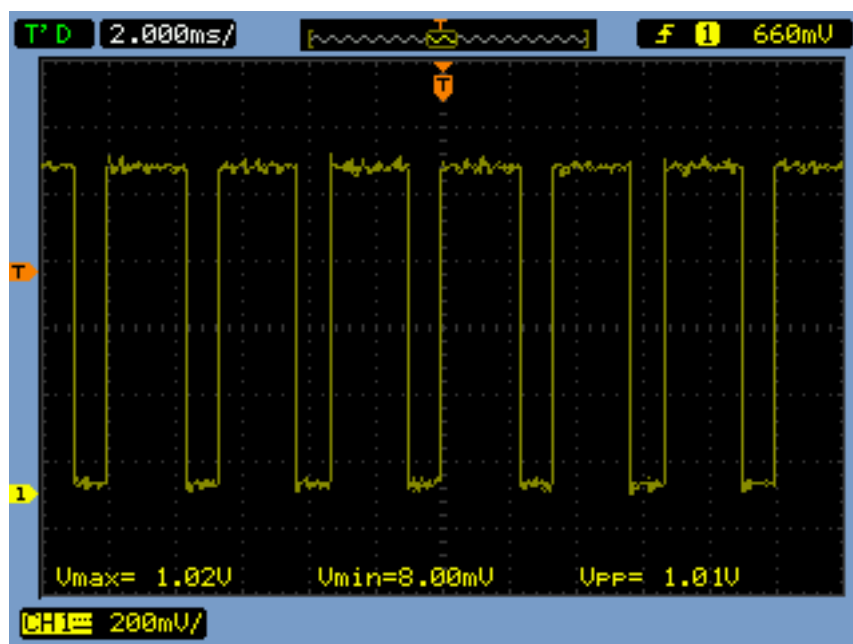


Fig. 3 Beam parameter product of 3.3 mm x mrad (channel 1) after the 15 m of process fiber Ø 100 µm and optical head F120/F300, measured by means of Primes Focus Monitor FM-120

Laserová hlava je zde jiná než hlava používaná v experimentu, proto se i hodnoty částečně liší od skutečných hodnot laseru používaného v experimentu [67].

PŘÍLOHA 2

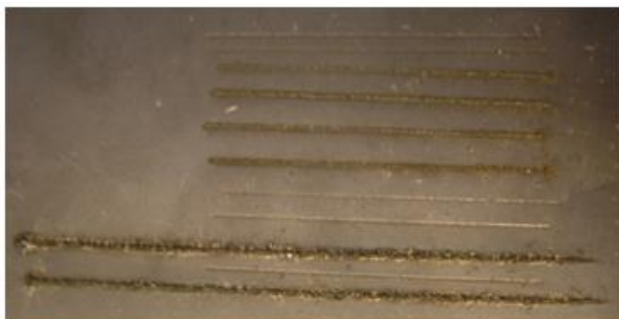
Záznam z osciloskopu.



PŘÍLOHA 3

Postup provedení experimentu.

Hledání optimálních pracovních parametrů.



Konstrukční ocel



Korozi-vzdorná ocel.

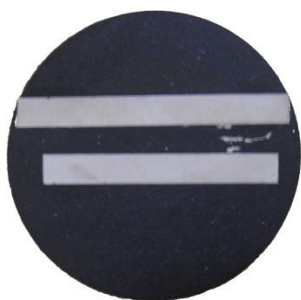
Gravírované drážky, které byly následně vyhodnocovány, počet průjezdů shora – 16, 8, 4, 2, 1



Konstrukční ocel



Korozi-vzdorná ocel

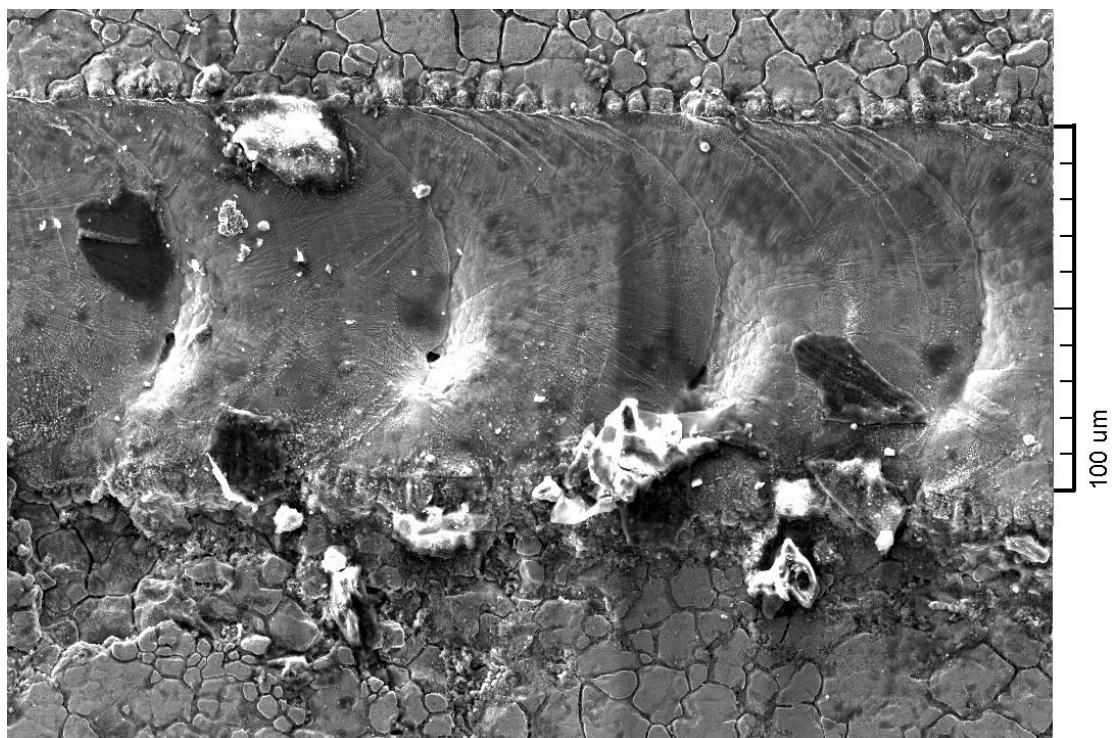


Zalisované vzorky připravené pro vyhodnocování pomocí laserového konfokálního (světelného) mikroskopu.

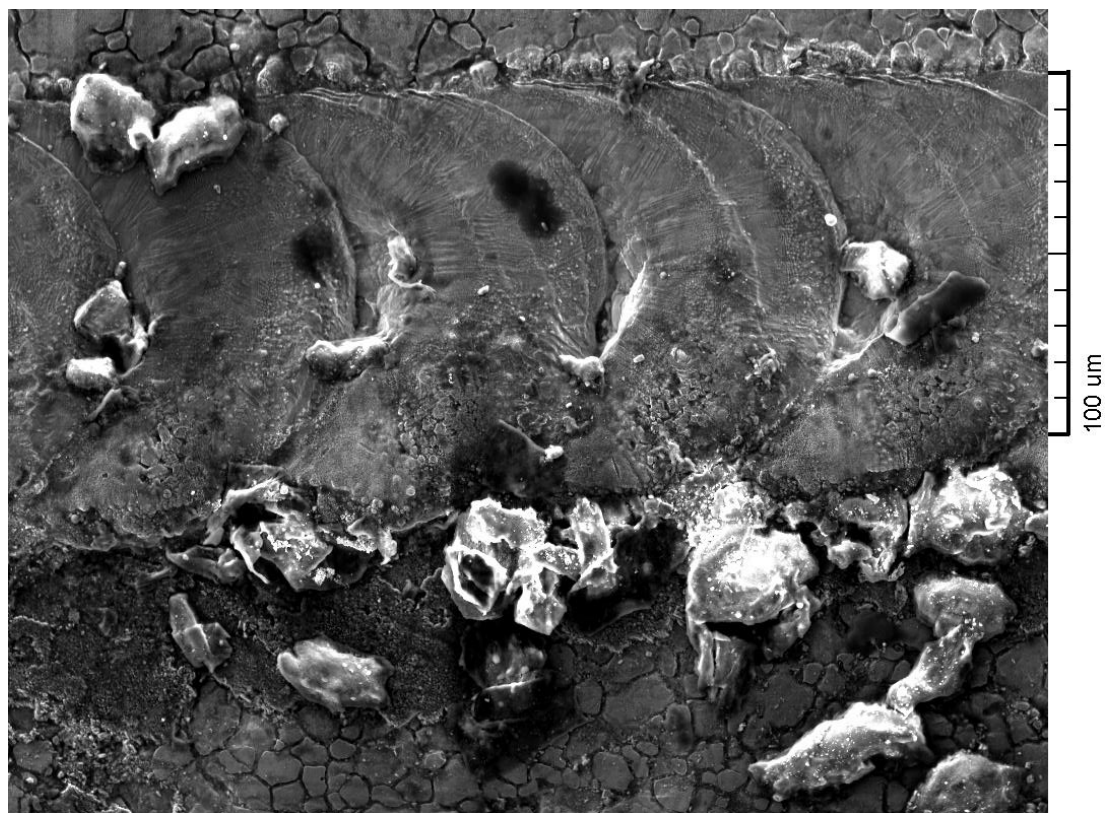
PŘÍLOHA 4 – 1/3

Snímky z elektronového mikroskopu při různém zvětšení.

1 průjezd laserového paprsku (500x zvětšené)



2 průjezdy laserového paprsku (500x zvětšené)



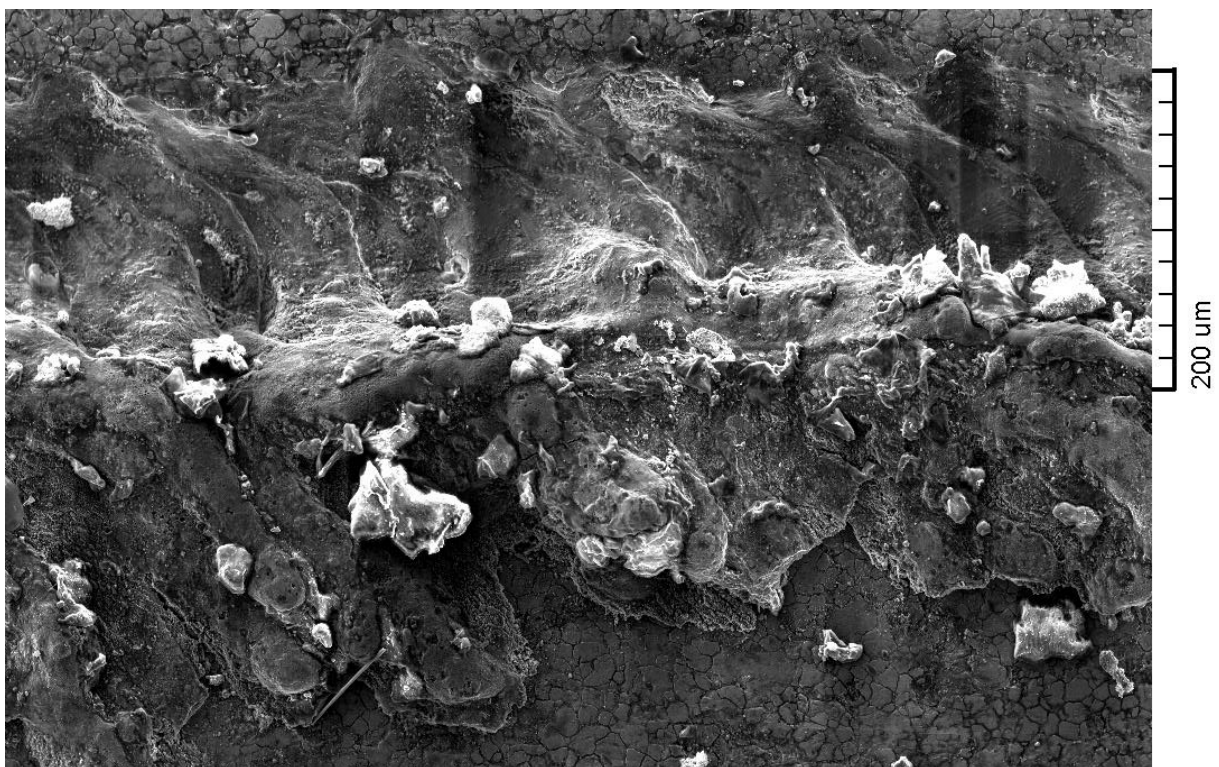
PŘÍLOHA 4 – 2/3

Snímky z elektronového mikroskopu při různém zvětšení.

4 průjezdy laserového paprsku (200x zvětšené)



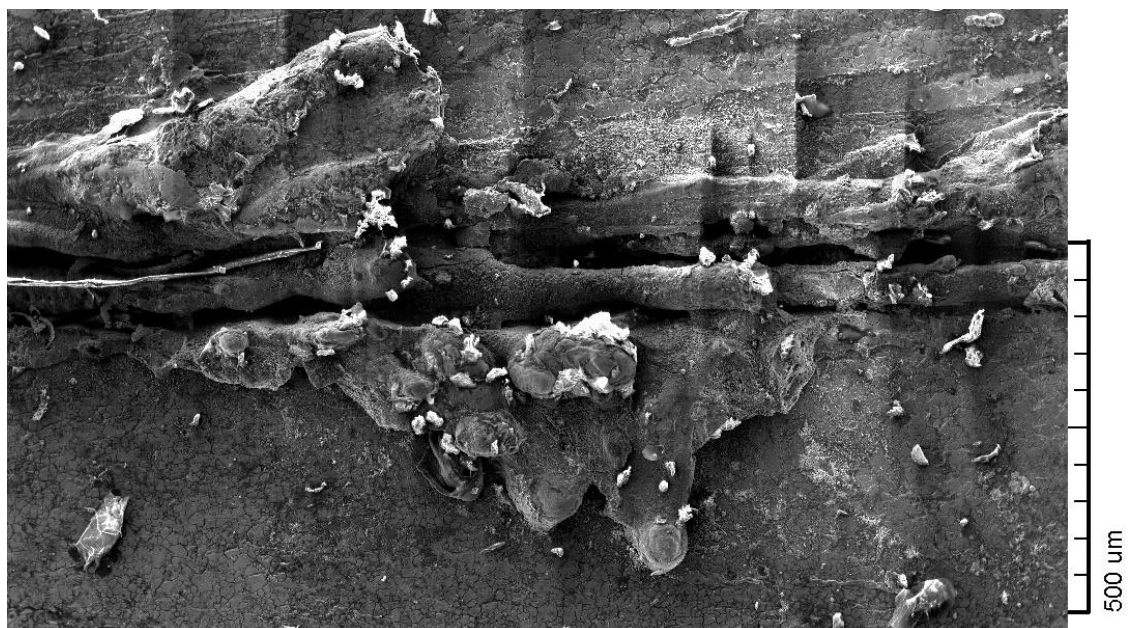
8 průjezdů laserového paprsku (200x zvětšené)



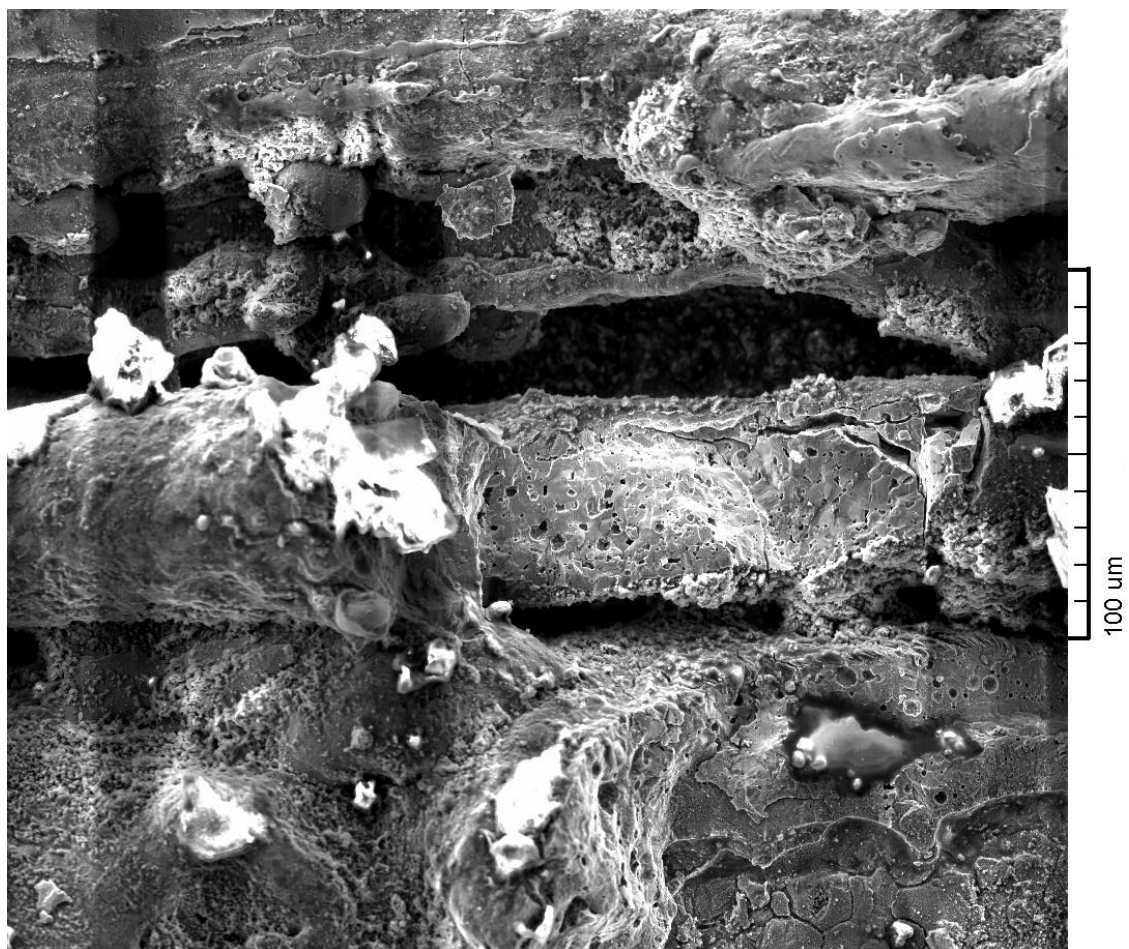
PŘÍLOHA 4 – 3/3

Snímky z elektronového mikroskopu při různém zvětšení.

16 průjezdů laserového paprsku (100x zvětšené)

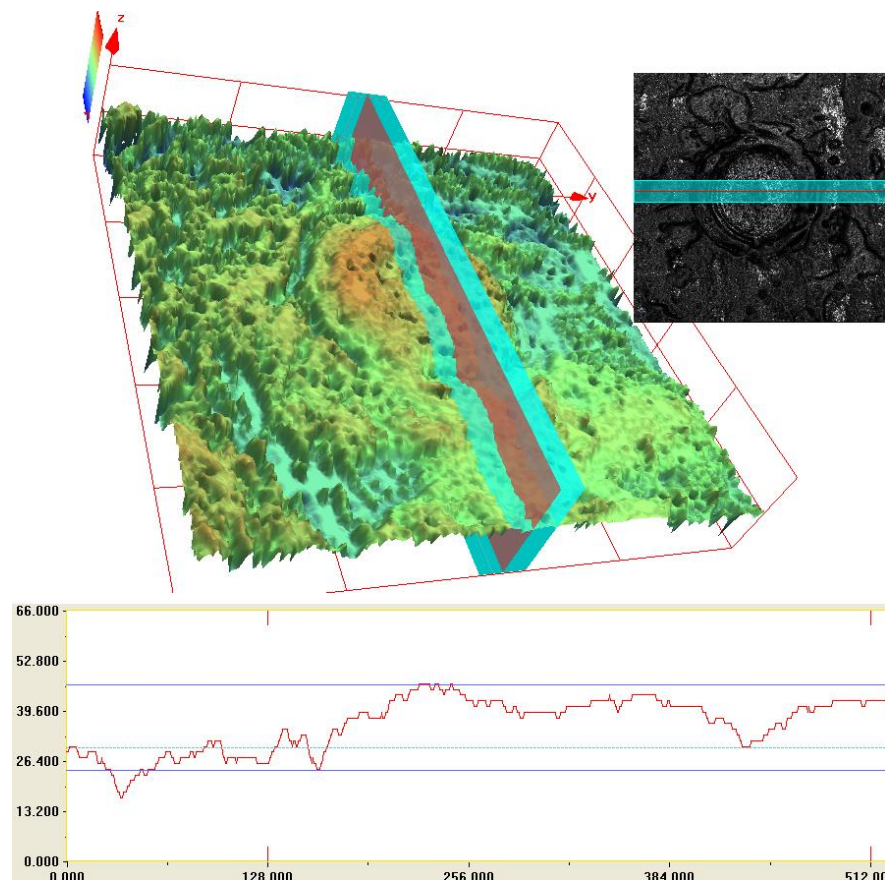


16 průjezdů laserového paprsku (500x zvětšené)

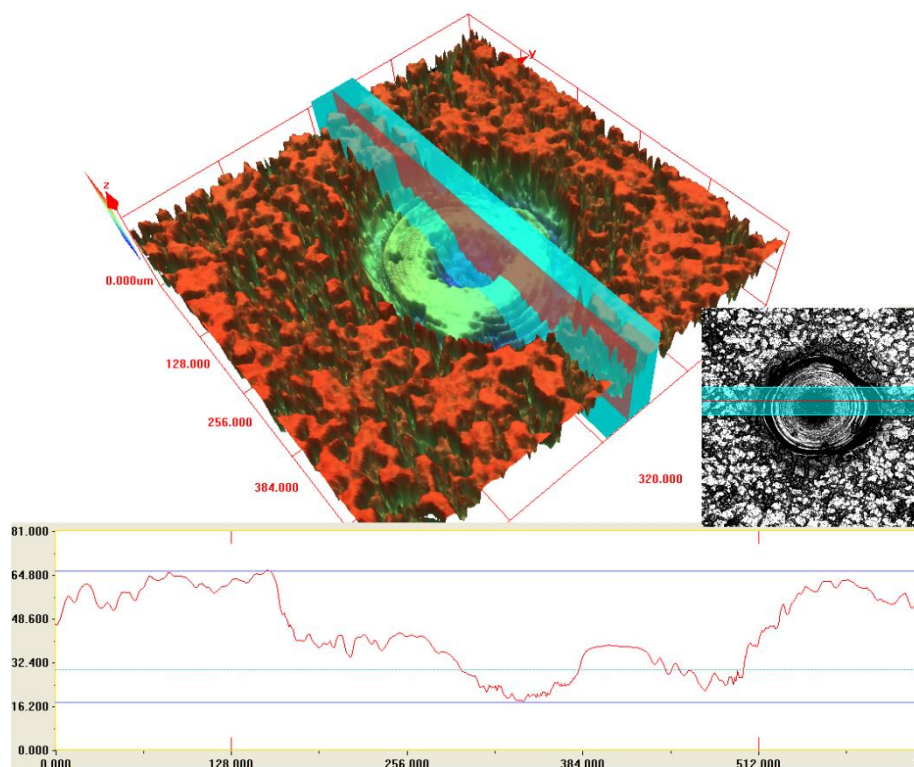


PŘÍLOHA 5 - 1/2

Zobrazení 3D kráterů pomocí laserového konfokálního mikroskopu.



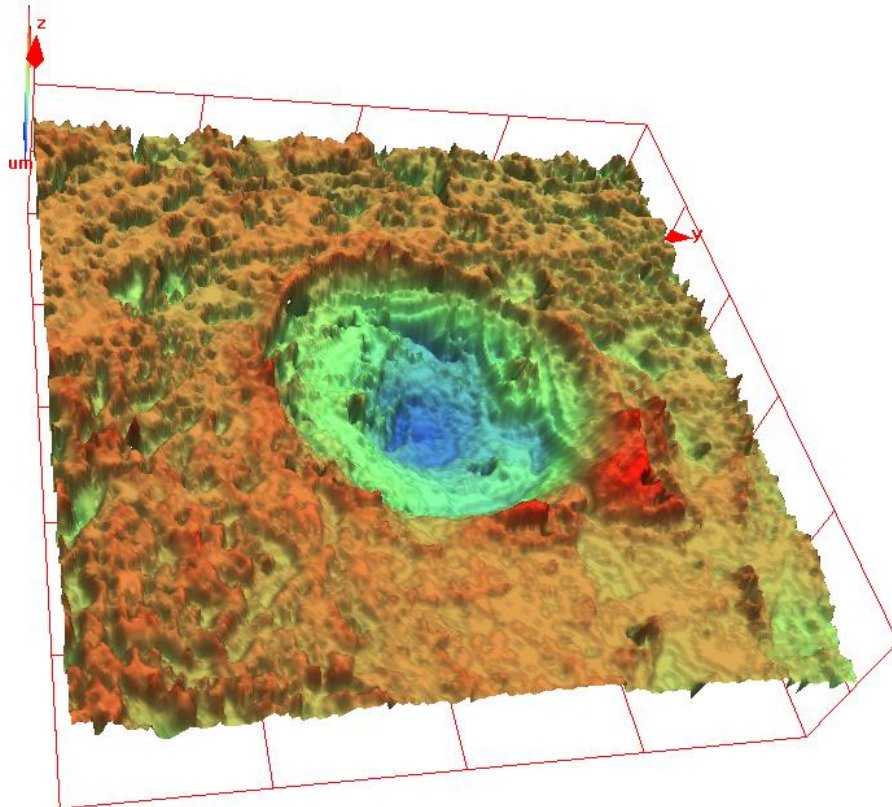
Konstrukční ocel
Puls z řady 2
(Špičkový výkon
800W).



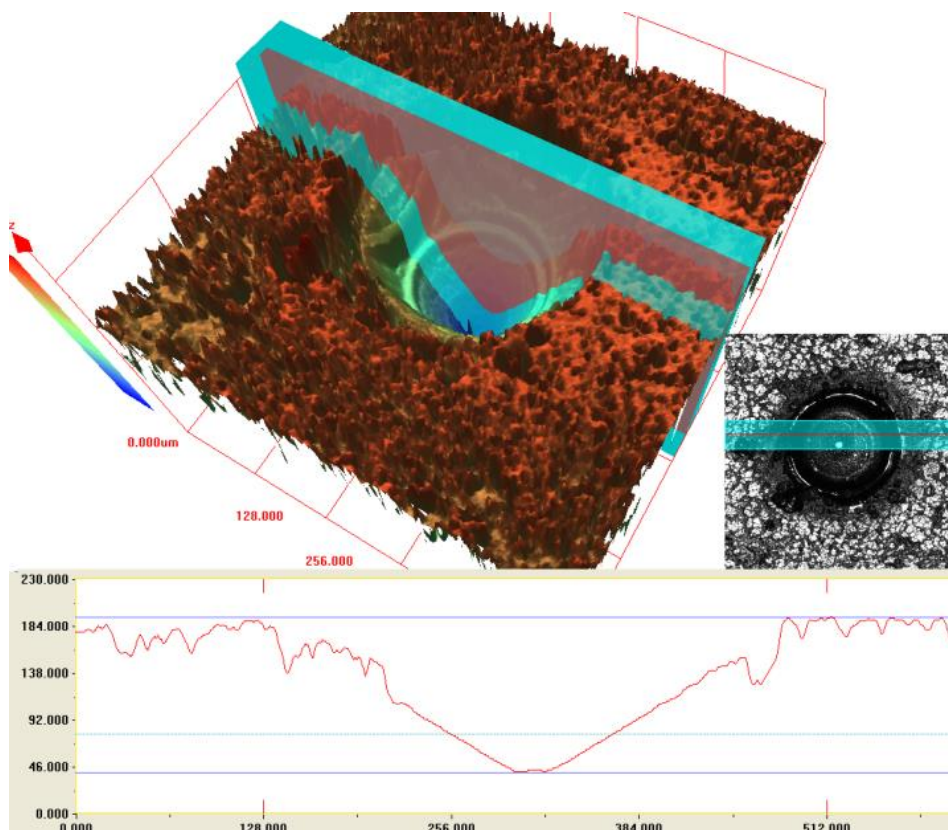
Korozivzdorná ocel
Puls z řady 2
(Špičkový výkon
800W).

PŘÍLOHA 5 - 2/2

Zobrazení 3D kráterů pomocí laserového konfokálního mikroskopu.



Konstrukční ocel
Puls z řady 2
(Špičkový výkon
1200W).



Korozivzdorná ocel
Puls z řady 2
(Špičkový výkon
1200W).

PŘÍLOHA 6

Snímky gravírované plochy na konstrukční a korozivzdorné oceli.

Konstrukční ocel



Korozivzdorná ocel



PŘÍLOHA 7

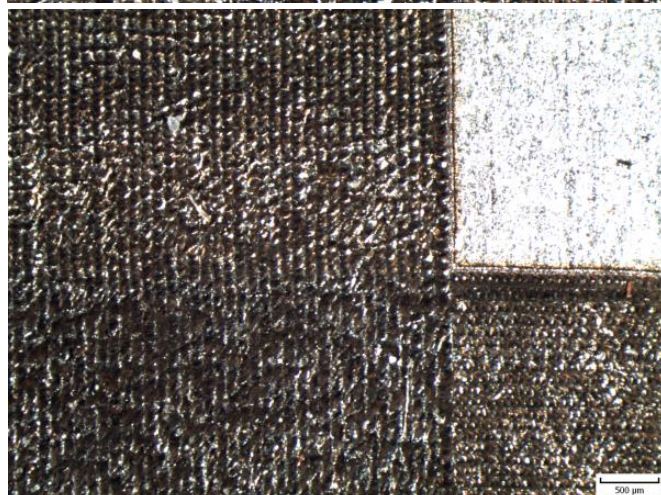
Zvětšené snímky gravírované plochy na konstrukční a korozivzdorné oceli pomocí stereo mikroskopu s vyhodnocením drsností povrchů.

Konstrukční ocel



Korozivzdorná ocel

Korozivzdorná ocel



Povrch konstrukční oceli

Ra	0.390 μm
Rz	2.238 μm
RSm	80 μm

Gravírovaný povrch konstrukční oceli

Ra	7.172 μm
Rz	33.32 μm
RSm	101 μm

Povrch korozivzdorné oceli

Ra	0.451 μm
Rz	2.882 μm
RSm	30 μm

Gravírovaný povrch korozivzdorné oceli

Ra	4.129 μm
Rz	18.11 μm
RSm	112 μm

R Profil
Lc GS
HOR
VER



R Profil
Lc GS
HOR
VER

